

排出微粒子低減用高周波誘導加熱電源の研究

著者	信田 剛秀
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	1996
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000673/

修 士 論 文

排出微粒子低減用
題 目 高周波誘導加熱電源の研究

指導教官 畑中 義博 教授

商船学研究科
課程名 商船システム工学専攻
平成7年度入学

学籍番号・氏 名 9 5 1 1 2 信田 剛秀

9 年 / 月 31 日 提 出



目 次

第 1 章	緒言	(3)
第 2 章	誘導加熱の原理とシステム構成	
2. 1	高周波誘導加熱の原理	(5)
2. 2	排出微粒子低減用誘導加熱システム	(7)
第 3 章	高周波誘導加熱用電源	
3. 1	主回路構成	
3. 1. 1	フルブリッジ高周波インバータ回路	(8)
3. 1. 2	従来形フルブリッジ Z C S 高周波インバータ回路	(9)
3. 1. 3	改良形フルブリッジ Z C S 高周波インバータ回路	(1 0)
3. 1. 4	D C L 型フルブリッジ Z C S 高周波インバータ回路	(1 1)
3. 2	スイッチングモードとモード遷移	(1 3)
3. 3	ゼロ電流スイッチングの原理	(1 8)
第 4 章	高周波インバータの特性解析	
4. 1	数値解析と状態方程式	
4. 1. 1	回路方程式	(2 0)
4. 1. 2	無次元化パラメータの導入	(2 4)
4. 1. 3	無次元化状態方程式	(2 5)
4. 2	スイッチングモード遷移	(2 9)
第 5 章	Z C S 動作特性	
5. 1	リアクトル比 α の影響	
5. 1. 1	リアクトル比 α の影響	(3 5)
5. 1. 2	動作波形比較	(4 0)
5. 1. 3	ターンオン・オフ波形比較	(4 2)
5. 1. 4	スイッチング損失	(4 5)
5. 2	Z C S 動作領域	(4 7)
5. 3	諸特性分布	(4 9)
5. 4	従来 Z C S 型との動作領域比較	(5 8)
5. 5	従来 Z C S 型との特性値分布比較	(5 9)

第6章	回路設計	・・・・・・・・・・・・・・・・	(62)
第7章	排出微粒子低減用高周波誘導加熱装置の設計と実験		
7.1	排出微粒子低減用高周波誘導加熱装置	・・・・・・・・	(65)
7.2	実験	・・・・・・・・	(66)
7.3	動作波形	・・・・・・・・	(68)
7.4	フィルタの構造による検討	・・・・・・・・	(122)
7.5	温度変化による金属フィルタの変化	・・・・・・・・	(124)
第8章	結言	・・・・・・・・	(125)
	謝辞	・・・・・・・・	(127)
	参考文献	・・・・・・・・	(128)

第 1 章 緒言

近年、船用あるいは陸上のボイラやディーゼルエンジン等から排出される微粒子 (PM: Particulate Matter) は、 NO_x や SO_x と共に大気環境汚染の元凶として問題となっている。特に PM は、スート・ファイアを発生させたりシステムの熱効率を低下させるほか、人体に与える影響として肺ガンやアレルギーを引き起こす原因とも言われ、その対策の検討が望まれている。

一方、半導体技術の著しい進歩により、パワーエレクトロニクス技術は広範囲に利用され身近なものとなった。その新しい分野として、高周波領域の電力変換装置があり、その技術を利用した応用の一つに高周波誘導加熱⁽¹⁾がある。これは高周波交流によって発生する磁界の変化により磁性体を非接触加熱する装置で、金属の焼き入れや電磁調理器等に応用⁽²⁾されている。

本研究ではこの高周波誘導加熱の応用として、ディーゼル機関の排気管に接続された金属フィルタで PM を捕捉し、高周波誘導加熱の非接触高温加熱によって PM を燃焼させ低減するシステムを提案すると共に、その高周波誘導加熱用電源の設計、開発について検討している。

高周波電源としての高周波インバータの適用においては、その高周波化に伴う諸問題も発生している。すなわち高周波化によるスイッチング時間の短縮に伴い、スイッチングの遅れ時間等に起因するスイッチング損失の増加や、スイッチング時のサージや、電磁ノイズの発生等である。その対策として、電流や電圧のゼロクロス時点でスイッチングする、いわゆるゼロ電流スイッチング (ZCS) や、ゼロ電圧スイッチング (ZVS) が種々検討されている。しかし、一般に ZCS 方式ではスイッチング素子に流れる電流のピーク値、ZVS 方式では電圧のピーク値が過大となりやすく、回路設計ではその値の把握が重要となる。

高周波誘導加熱は、高周波電流によって発生する磁界の変化を利用するものであり、大電流低電圧駆動による ZCS 動作の高周波インバータがその電源として適している。ZCS 動作高周波インバータにも種々のタイプがあるが、スイッチング素子に直列にアノード・リアクトルを接続したタイプの高周波インバータは、既に報告済み⁽³⁾である。このタイプのインバータはアノード・リアクトルの作用により、スイッチング時の転流重複現象を利用して di/dt を軽減すると同時に、ZCS 動作を実現している。しかし、過渡動作等において主スイッチの電流が強制消弧されるような動作においては、アノード・リアクトルにおける $L \times (di/dt)$ に起因するスパイク電圧が発生しやすい問題があった。

今回報告する直流リアクトル（DCL）形インバータでは、スイッチング素子にIGBTを用いたZCS方式として、逆素子ダイオードや余分な補助転流回路等を使用せずに、転流重複現象を利用したZCS動作としてのソフトスイッチングを実現している。

本論文では、無次元化パラメータ（ μ 、 λ ）を導入したZCS動作特性の数値解析から、そのZCS諸特性を明らかにしている。また、誘導加熱の負荷として排出微粒子低減システムを提案、その金属フィルターの構造を検討、製作し、回路の特性解析に基づく回路実設計よりシステムを製作、駆動し、評価・検討を行っている。

第2章 誘導加熱の原理とシステム構成

2.1 高周波誘導加熱の原理

金属などの磁性体の中を貫く磁束 Φ が変化すると、金属中には磁束の変化を妨げる向きに、誘導起電力が生じ、図1のように渦電流 I が流れる。このとき、金属の抵抗 R によって、被加熱体に I^2R のジュール熱が発生し、金属は発熱する。

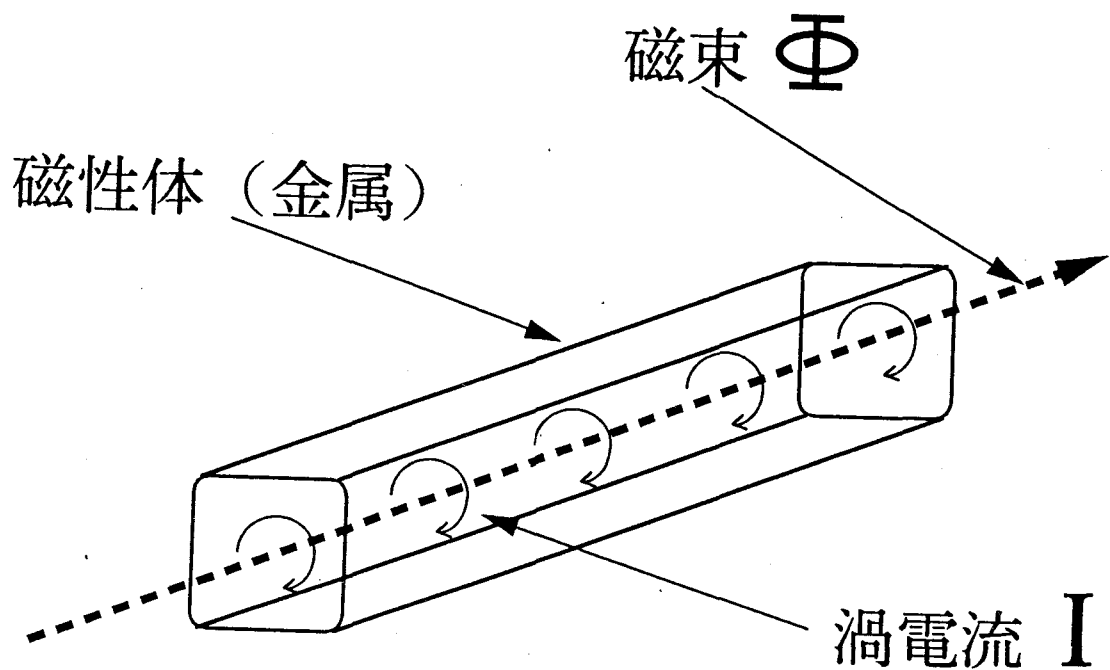


図1 誘導加熱の原理

高周波誘導加熱とは、図2に示すように、高周波インバータ駆動による高周波交流を励磁コイルとしてのワーキングコイルに印加すると、高周波磁束が磁性体の被加熱物を貫通して、起電力を発生し、被加熱物内部に渦電流が流れる。この渦電流と被加熱物の固有抵抗により生じるジュール熱によって、加熱する方式であり、被加熱物体の非接触加熱が最大の特徴である。

この原理を応用した誘導加熱装置は、高効率、省力化、また、急速加熱が可能であり、温度制御が容易である、などの利点がある為、鋳造業、鉄鋼業界をはじめとして、広く普及している。

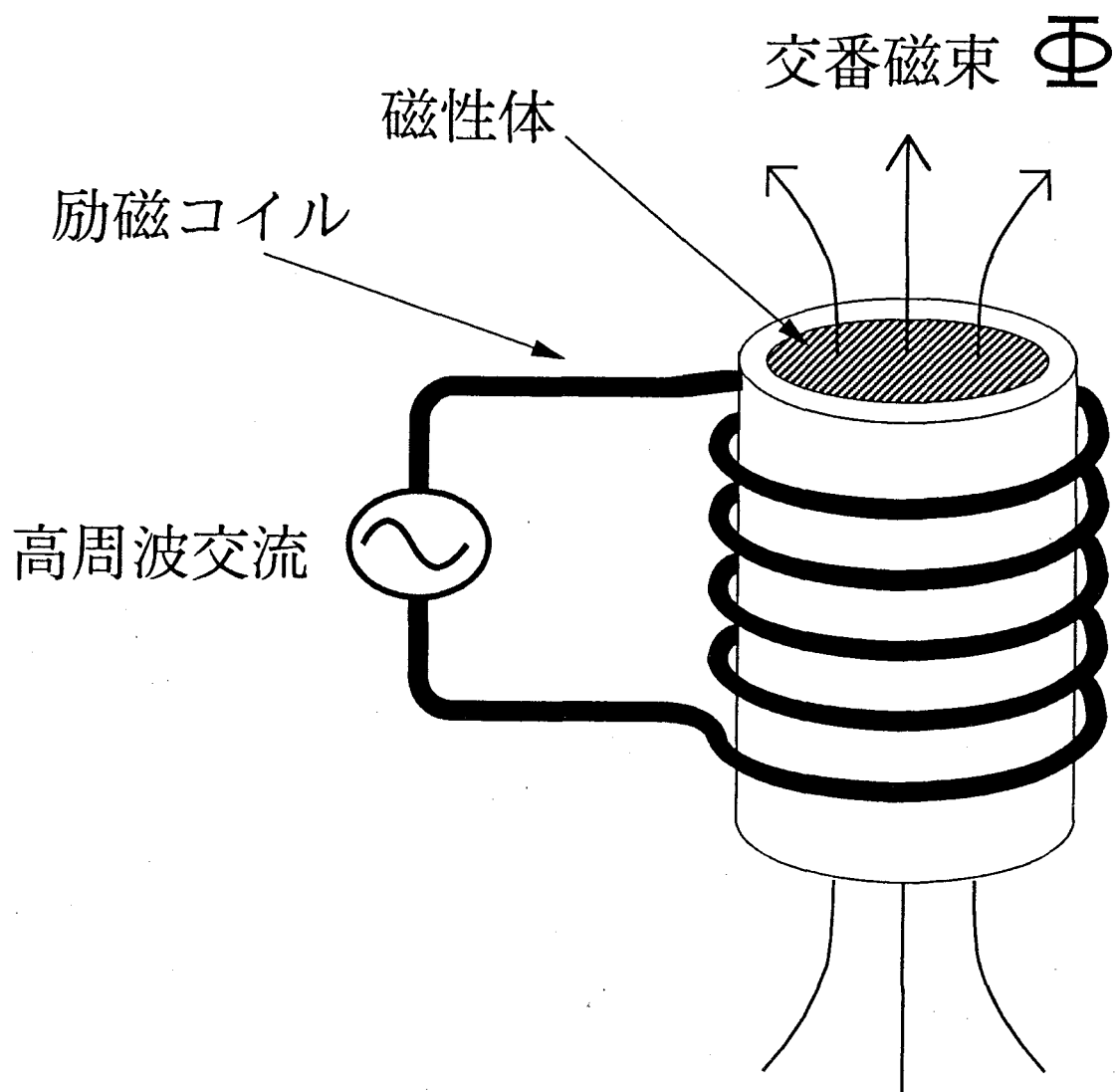


図2 高周波誘導加熱

2. 2 排出微粒子低減用誘導加熱システム

図3に、本論文で提案している排出微粒子低減システムを示す。図3において、ディーゼルエンジンから排出される排ガス中の排出微粒子は、排気管から誘導加熱部へ導かれ、高周波誘導加熱によって高温加熱された金属フィルタを通過させることによって、燃焼し、低減される。この場合、排出微粒子(PM)は、捕捉するのではなく、金属フィルタに接触した瞬間に550℃以上の高温で有機化合物成分を燃焼し、排気ガス中に含まれる不燃焼成分としての微量金属等は、そのまま通過し、排出される。排ガスエコノマイザを併用する場合は排出微粒子低減システムを、エンジンと排ガスエコノマイザ間に設置することにより、有効にその熱エネルギーを回収できる。なお、誘導加熱部の金属フィルタの構造をどのようにするかによって、誘導加熱の効果に影響を及ぼし、ディーゼルエンジンにかかる背圧も変化する。従って、その構造に関しては、種々のフィルタを試行錯誤的に実験してみる必要がある。

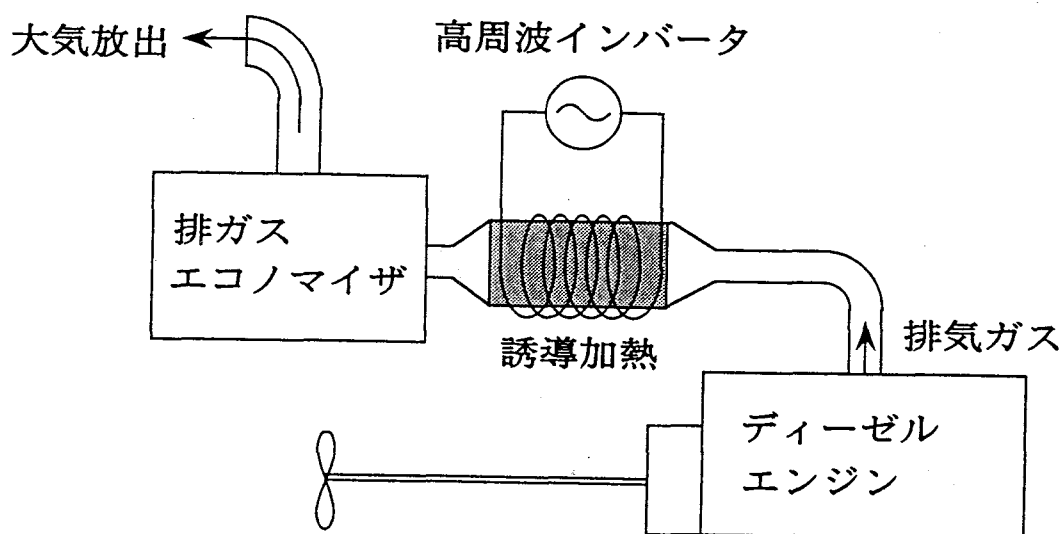


図3 排出微粒子低減用誘導加熱システム

第3章 高周波誘導加熱用電源

3. 1 主回路構成

3. 1. 1 フルブリッジ高周波インバータ回路

図4は高周波誘導加熱電源としてのフルブリッジ高周波インバータを示す。この回路構成の場合、スイッチに直列に小リアクトルが入っていないため、自然転流をした時のみ、ソフトスイッチングが可能となる。それ以外は、強制消弧となり、理論上、電流の変化率 di/dt は無限大となる。その結果、スパイク電圧が発生し、スイッチング素子の破壊につながる恐れがある。

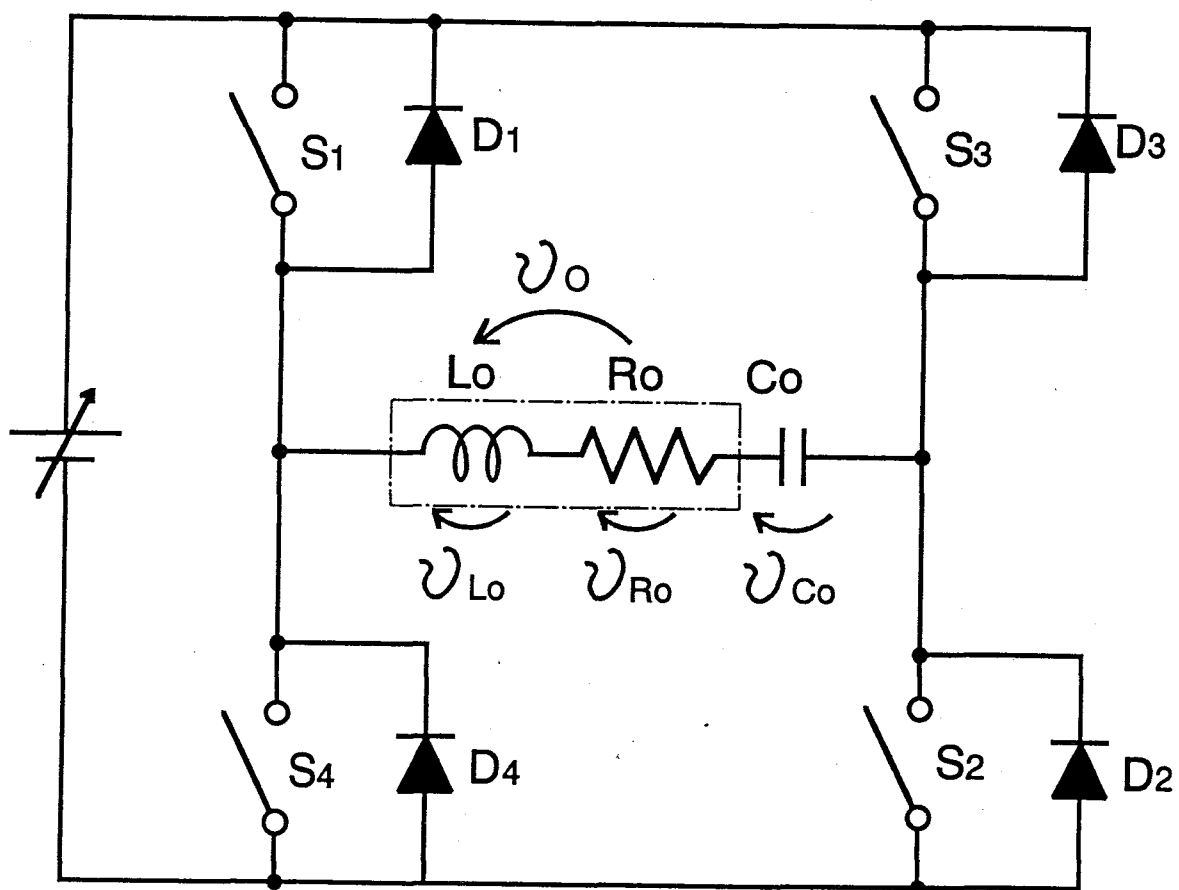


図4 フルブリッジ高周波インバータ

3. 1. 2 従来形フルブリッジZCS高周波インバータ回路

図5は、図4のフルブリッジ回路の各スイッチ（ $S_1 \sim S_4$ ）に、直列に小リアクトル（ $L_1 \sim L_4$ ）を接続した、従来型フルブリッジZCS高周波インバータである。この回路の場合、主スイッチ $S_1 \sim S_4$ に直列に接続される小リアクトルの作用により、スイッチのターンオン、ターンオフにおける、電流の変化率 di/dt を抑制し、ゼロ電流スイッチング（ZCS）を実現している。その結果、ゼロ電流スイッチング（ZCS）動作領域が広がり、自然転流時以外でもソフトスイッチングを可能としたものである。しかし、常に電流がこの小リアクトルに流れているため、リアクトルにおける導通損失や、ZCS動作領域外での強制消弧時にスパイク電圧が発生しやすく、スイッチング損失も増加する。

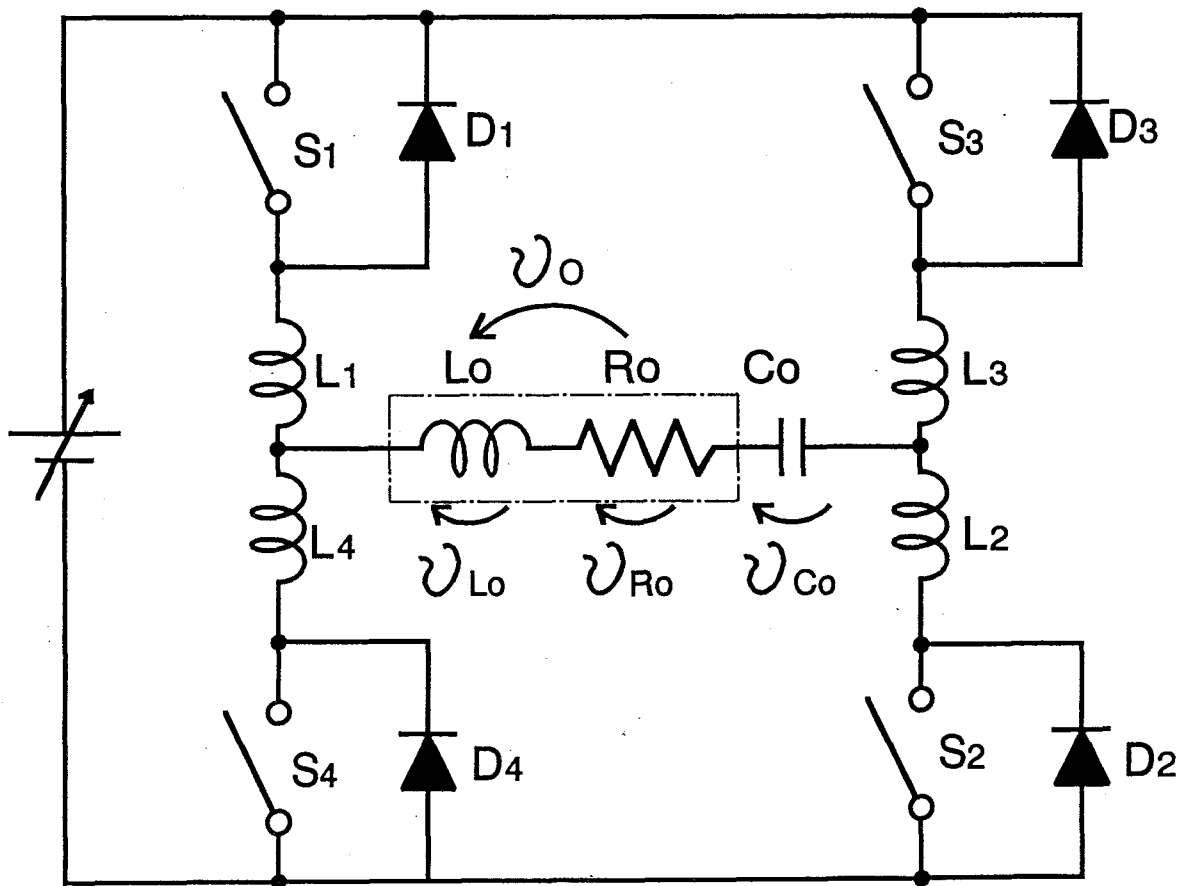


図5 従来型フルブリッジZCS高周波インバータ

3. 1. 3 改良形フルブリッジZCS高周波インバータ回路

従来型フルブリッジZCS高周波インバータの強制消弧時に、アノードリアクトル（ L_1 から L_4 ）に発生するスパイク電圧の問題を解決するために改良を加えたものが、図6に示す改良形フルブリッジZCS高周波インバータ回路である。この回路の最大の特徴は、各スイッチ（ $S_1 \sim S_4$ ）に逆並列に接続されるダイオード（ $D_{p1} \sim D_{p4}$ ）に直列に接続されるアノードリアクトル（ $L_1 \sim L_4$ ）が接続されることである。 $L_1 \sim L_4$ の接続により、従来型フルブリッジZCS高周波インバータと同様に、転流重複期間が存在するようになる。その結果、スイッチング時電流は $L_1 \sim L_4$ の作用により急変せずに、ソフトスイッチングとしてのゼロ電流スイッチングが実現し、スパイク電圧やスイッチングロスの抑制が可能となる。この回路方式の場合、主スイッチ $S_1 \sim S_4$ の電流が強制消弧されるような場合でも、主スイッチに直列にリアクトル $L_1 \sim L_4$ は接続されていないので、 $L_1 \sim L_4$ が原因でスパイク電圧を発生することではなく、漂遊インダクタンス成分を極力抑えた銅板配線により、強制消弧時でも、スパイクの抑制が可能となる特徴がある。

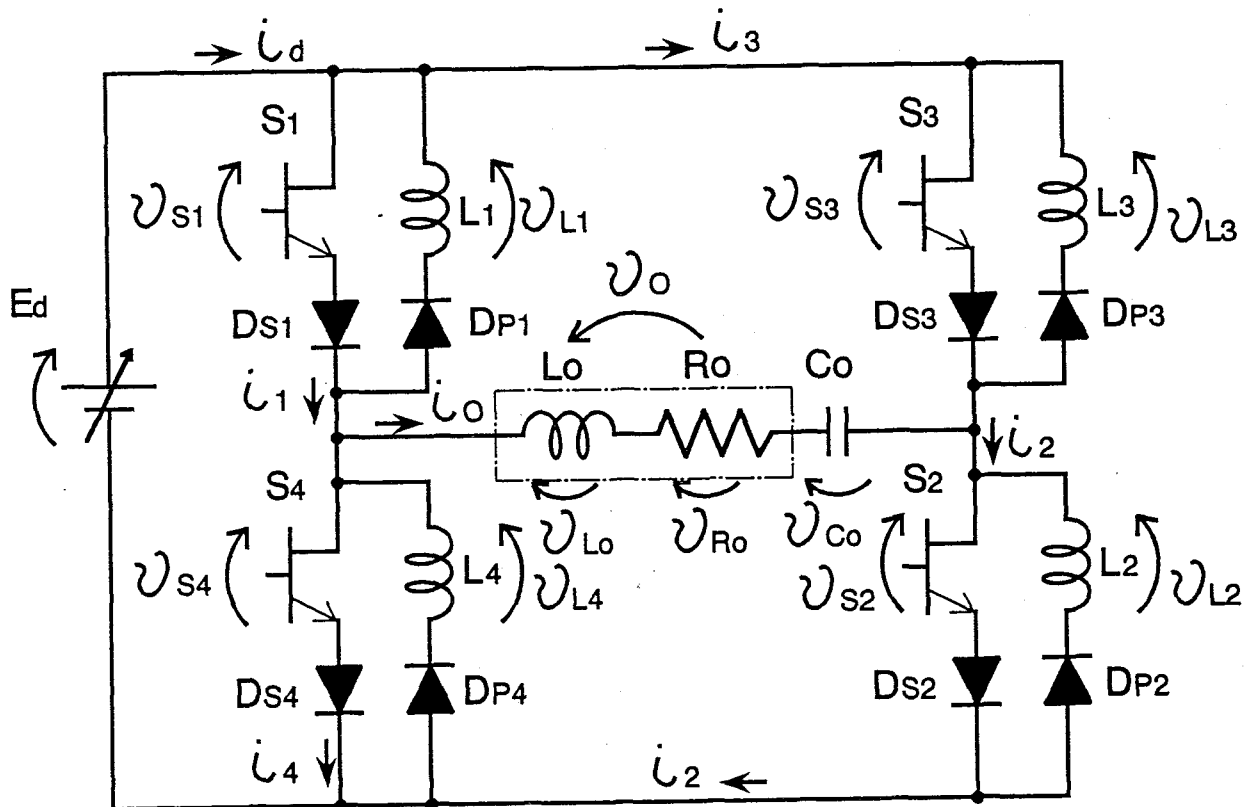


図6 改良形フルブリッジZCS高周波インバータ

3. 1. 4 DCL形フルブリッジZCS高周波インバータ回路

図6に示す改良型は、各スイッチに対し、逆並列に接続されるダイオードにアンロードリアクトルが直列接続されることで転流重複現象を起こし、ZCS動作を可能としていた。しかし、回路の部品点数が多くなってしまうと共に、逆並列ダイオードを内蔵したスイッチング素子モジュールを使用できないという制約があり、装置の大型化につながっていた。

今回提案する高周波誘導加熱電源としての図7に示すDCL型フルブリッジZCS高周波インバータは、スイッチング素子にIGBTを用い、このIGBTモジュール内の再生ダイオードを利用することにより、逆阻止ダイオードや、余分な補助転流回路等を使用せず、また、フルブリッジ形のリアクトル $L_1 \sim L_4$ を入力直流リアクトル L_d (DCL) として1つにまとめた形となっている。このDCL利用により転流重複現象を発生させ、これによりZCS動作を実現している。

本回路方式では、DCLの作用により電流は急変せずに、ソフトスイッチングとしてのゼロ電流スイッチングが可能となり、スパイク電圧やスイッチングロスが抑制できる。その上、IGBTモジュール適用により、回路の部品点数を大幅に減らすことが出来るため、回路の小型化にもつながる。

図7において一点鎖線で囲んだ部分が高周波インバータの負荷としての誘導加熱ユニットの等価回路で、ワーキングコイルのインダクタンス： L_o と、負荷抵抗： R_o の $L_o - R_o$ の直列等価回路で表される。

またスパイク電圧や電磁ノイズ抑制の観点により、スイッチング素子に直列に接続されるアームの浮遊インダクタンスを極力抑制するために銅板配線（ブスバー）を用いている。

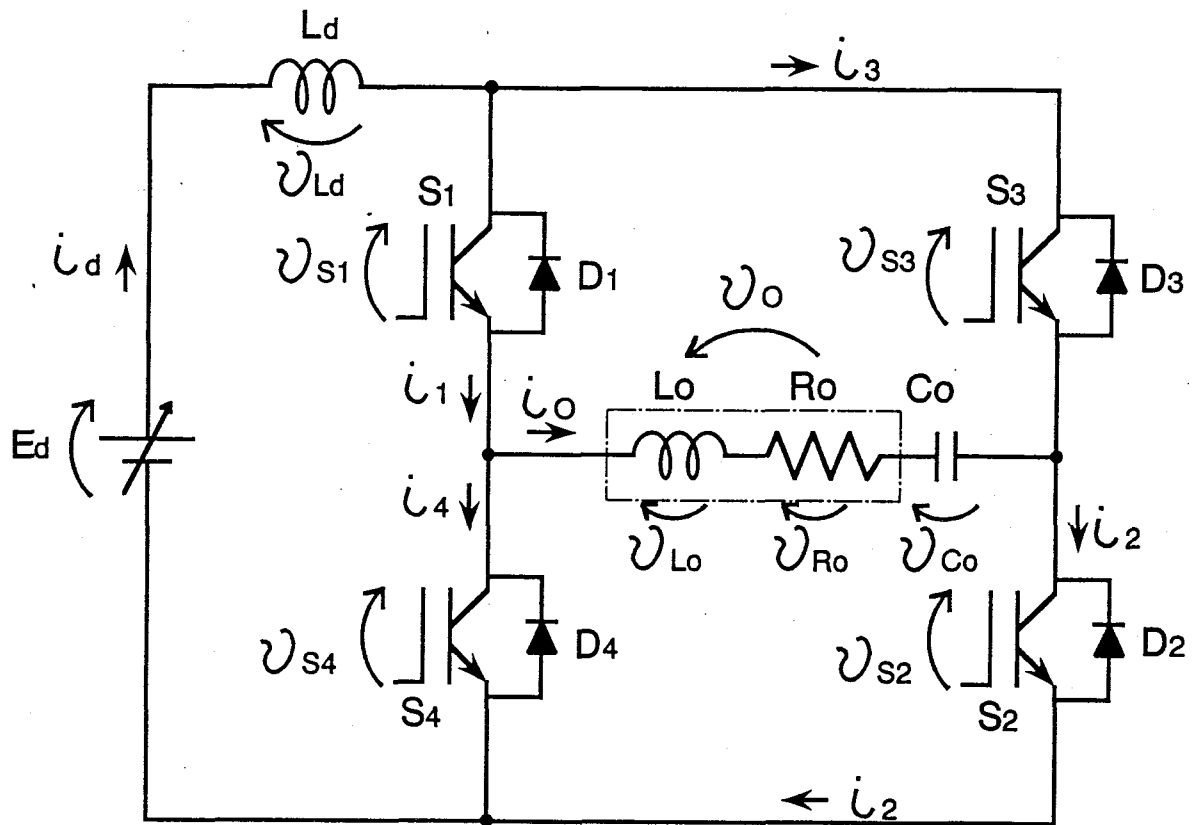


図7 DCL形フルブリッジZCS高周波インバータ

3. 2 スイッチングモードとモード遷移

回路のスイッチング動作モードはスイッチング素子の ON、OFF 状態から、次の 6 種類のモードが考えられる。

- ・モード (a) S1・S2 導通単流モード

$$E_d \rightarrow L_d \rightarrow S_1 \rightarrow L_o \rightarrow R_o \rightarrow C_o \rightarrow S_2 \rightarrow E_d$$
- ・モード (b) D1・D2 導通単流モード

$$E_d \rightarrow D_2 \rightarrow C_o \rightarrow R_o \rightarrow L_o \rightarrow D_1 \rightarrow L_d \rightarrow E_d$$
- ・モード (c) S3・S4・D1・D2 導通転流重複モード

$$E_d \rightarrow D_2 \rightarrow C_o \rightarrow R_o \rightarrow L_o \rightarrow D_1 \rightarrow L_d \rightarrow E_d$$

$$L_d \rightarrow S_3 \rightarrow C_o \rightarrow R_o \rightarrow L_o \rightarrow S_4$$
- ・モード (d) S3・S4 導通単流モード

$$E_d \rightarrow L_d \rightarrow S_3 \rightarrow C_o \rightarrow R_o \rightarrow L_o \rightarrow S_4 \rightarrow E_d$$
- ・モード (e) D3・D4 導通単流モード

$$E_d \rightarrow D_4 \rightarrow L_o \rightarrow R_o \rightarrow C_o \rightarrow D_3 \rightarrow L_d \rightarrow E_d$$
- ・モード (f) S1・S2・D3・D4 導通転流重複モード

$$E_d \rightarrow D_4 \rightarrow L_o \rightarrow R_o \rightarrow C_o \rightarrow D_3 \rightarrow L_d \rightarrow E_d$$

$$L_d \rightarrow S_1 \rightarrow C_o \rightarrow R_o \rightarrow L_o \rightarrow S_2$$

図 8～図 13 に各動作モードを示す。

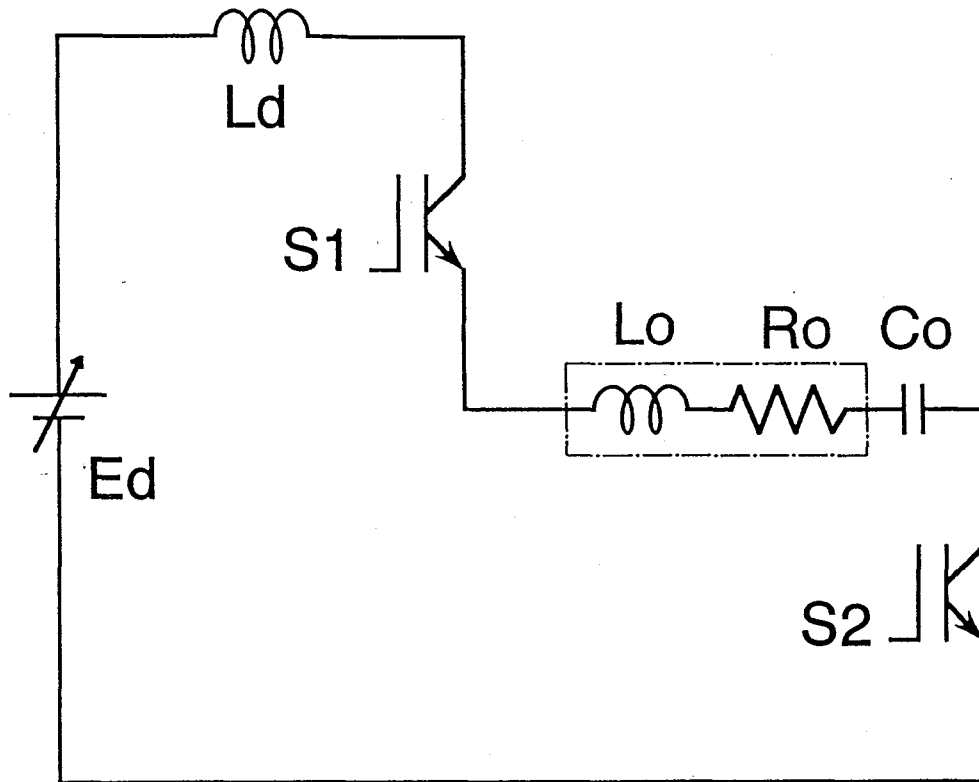


図8 モード (a) $S1 \cdot S2$ 単流モード

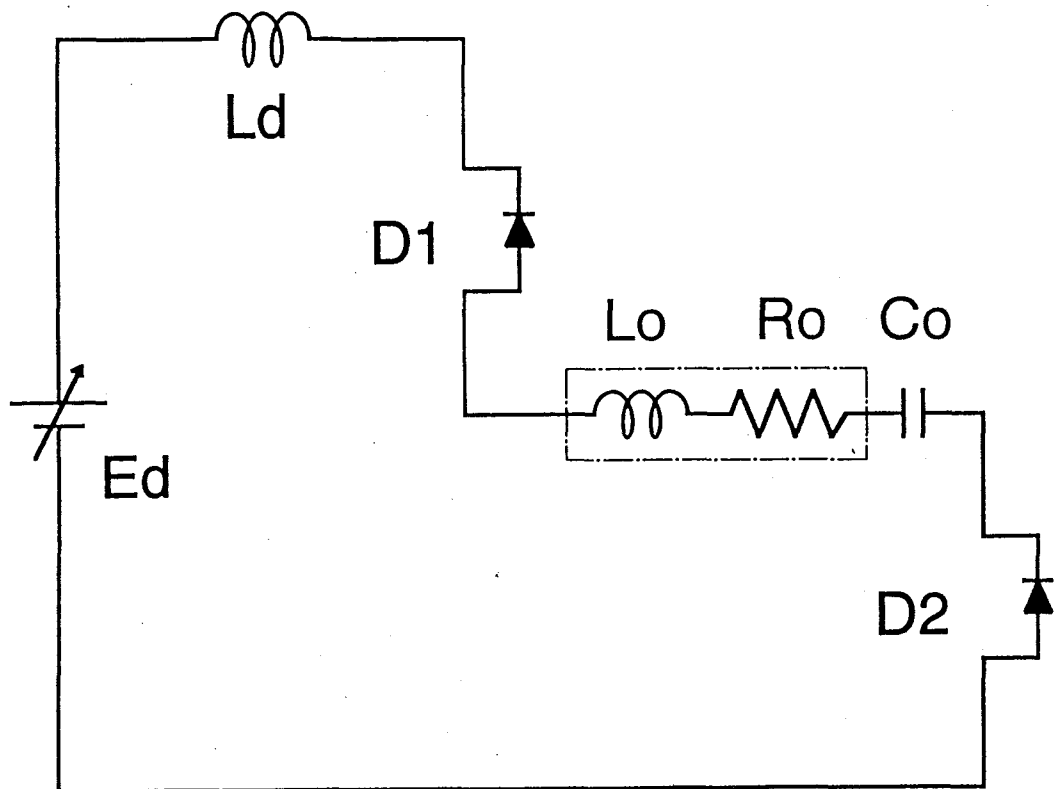


図9 モード (b) $D1 \cdot D2$ 単流モード

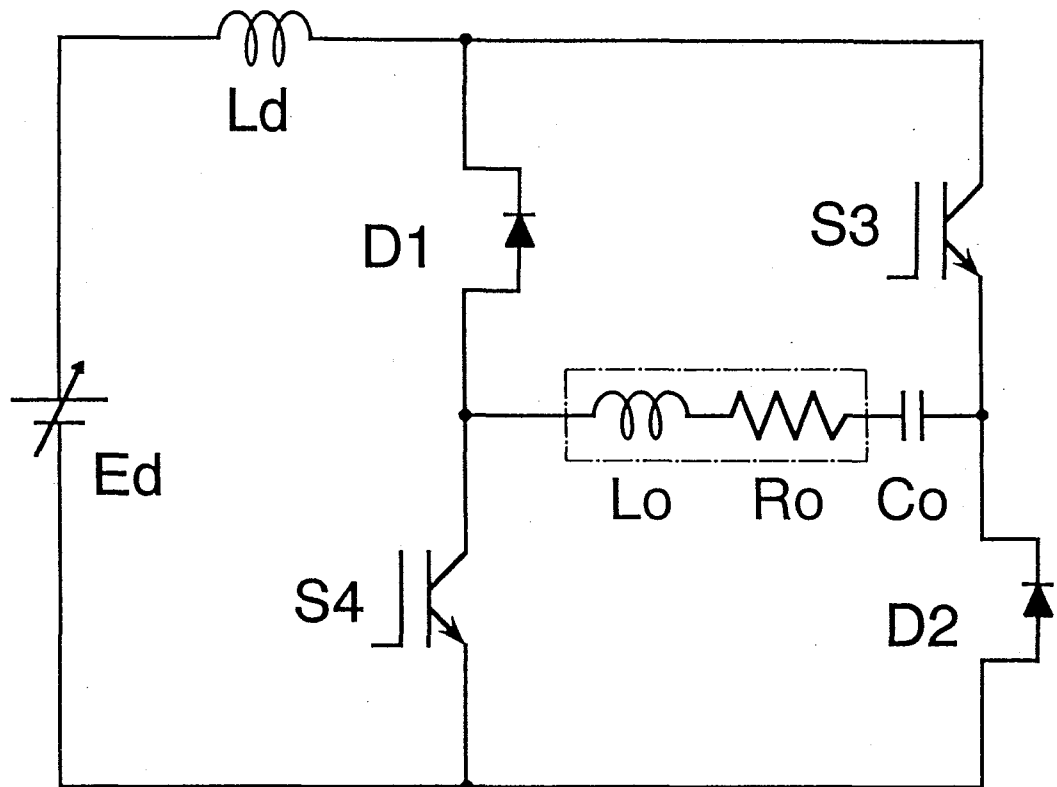


図10 モード(c) $S_3 \cdot S_4 \cdot D_3 \cdot D_4$ 転流重複モード

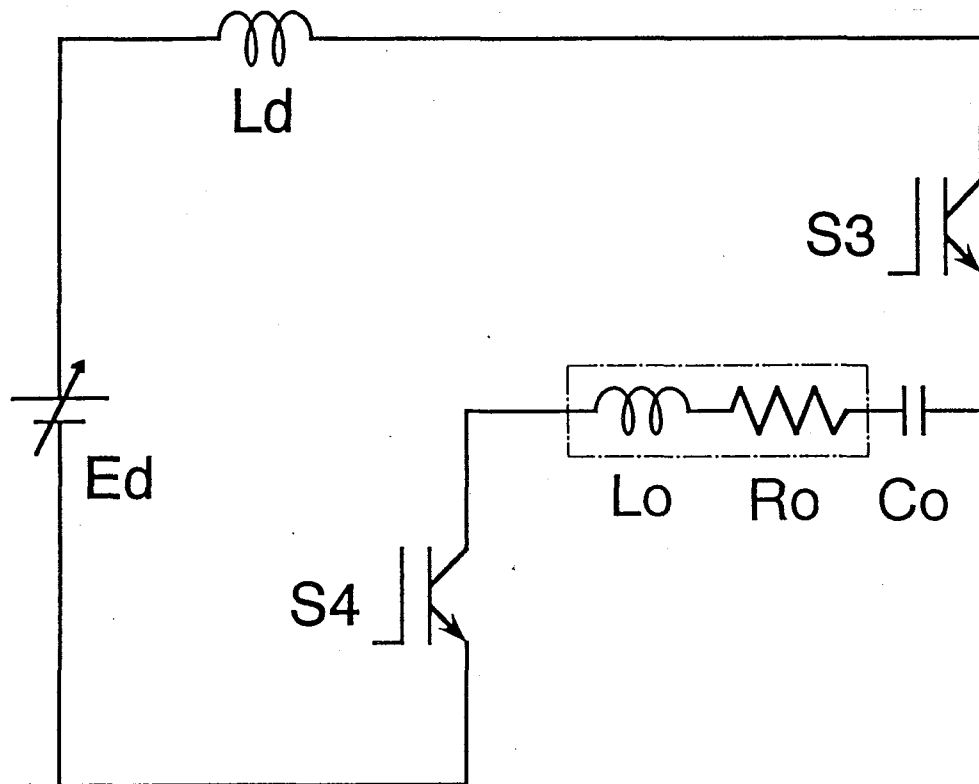


図11 モード(d) $S_3 \cdot S_4$ 単流モード

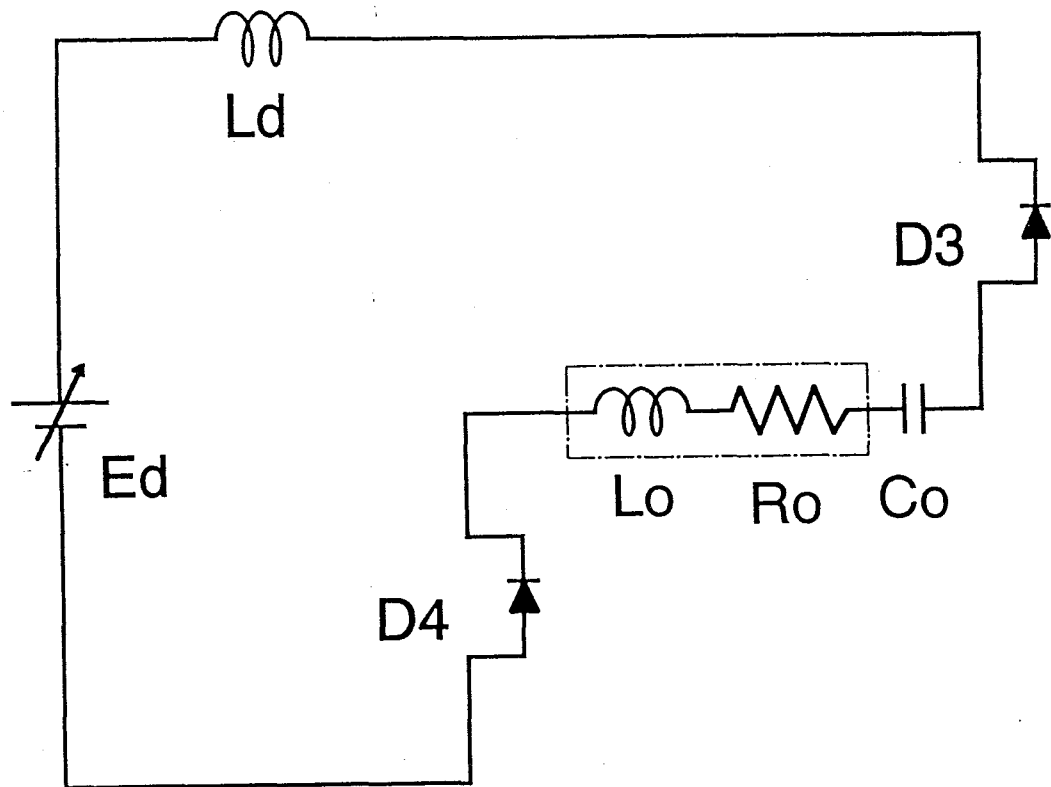


図 1 2 モード (e) $D_3 \cdot D_4$ 単流モード

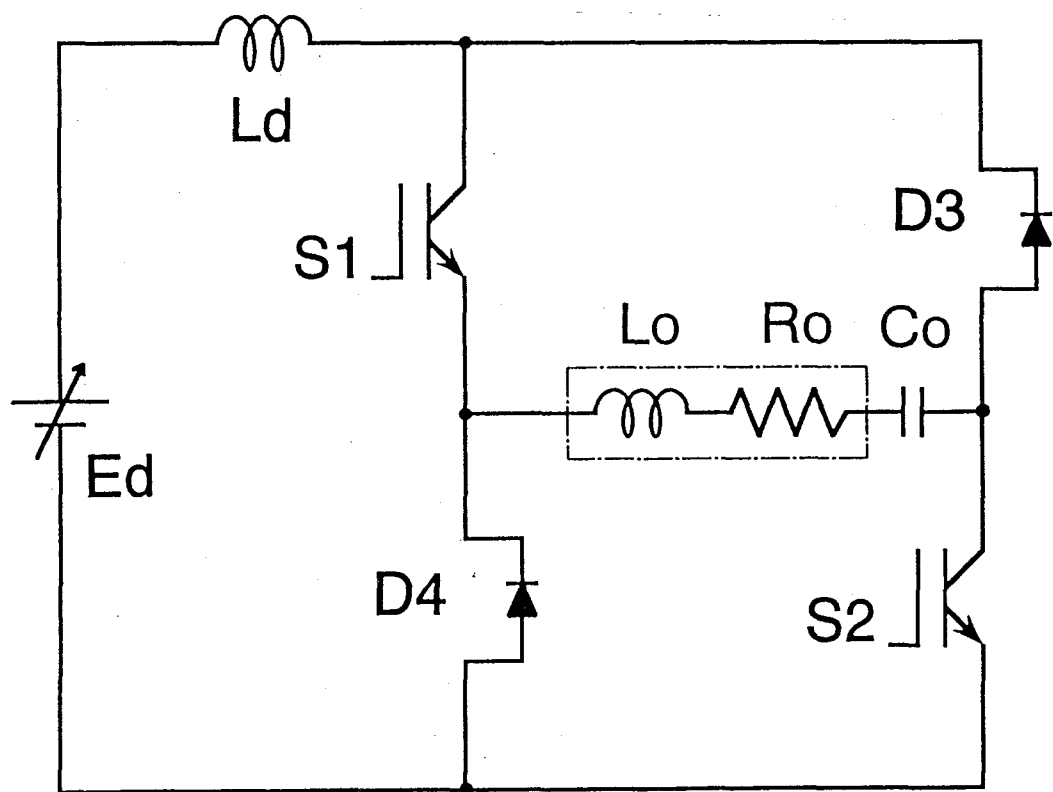


図 1 3 モード (f) $S_1 \cdot S_2 \cdot D_3 \cdot D_4$ 転流重複モード

図14に動作原理波形として、スイッチング電流波形と、各モードの対応を示す。時刻 $Z = 0$ 時点で $S1 \cdot S2$ にゲート信号が印加される前の $D3 \cdot D4$ 導通時に、 $S1 \cdot S2$ ゲート信号 $V_{GE1} \cdot V_{GE2}$ が印加され、順バイアスすると、 $S1 \cdot S2$ と $D3 \cdot D4$ が同時に導通する重流モードのモード(f)となる。 $D3 \cdot D4$ の電流が徐々に小さくなりゼロになると、 $S1 \cdot S2$ 単流モードのモード(a)となり、引き続き i_1, i_2 が負となると、 $D1 \cdot D2$ 単流モードのモード(b)となる。 $D1 \cdot D2$ が導通している時点で、今度は $S3 \cdot S4$ に順バイアストリガ信号 $V_{GE3} \cdot V_{GE4}$ が印加されると、 $S3 \cdot S4$ と $D1 \cdot D2$ が同時に導通する重流モードのモード(c)となり、 $D1 \cdot D2$ の電流は徐々に小さくなりゼロとなると、 $S3 \cdot S4$ 単流モードのモード(d)となる。引き続き、 i_3, i_4 が負となると、 $D3 \cdot D4$ が導通する単流モードのモード(e)となり、再び $V_{GE1} \cdot V_{GE2}$ が印加され、 $S1 \cdot S2$ が順バイアスすると $S1 \cdot S2 \cdot D3 \cdot D4$ 重流モードのモード(f)となる。

定常ZCS動作においては、以上のスイッチングモードを周期的に繰り返すことになる。

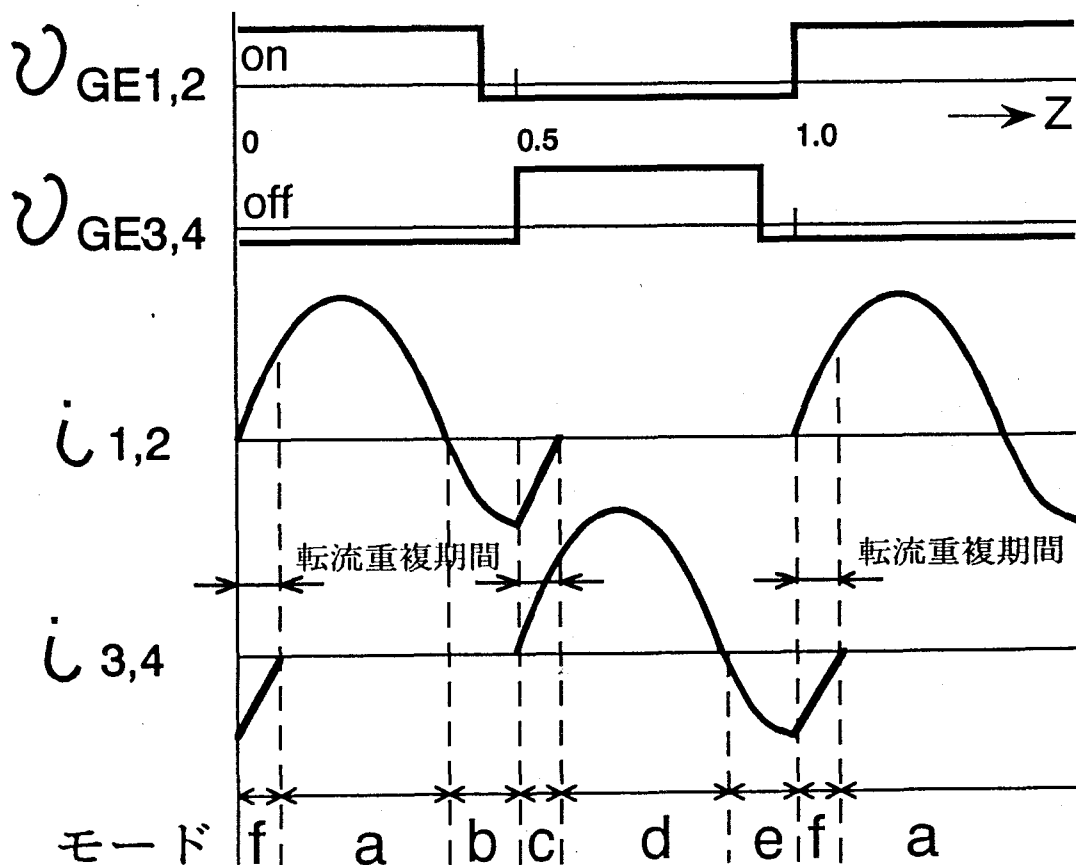


図14 スイッチング動作波形

3. 3 ゼロ電流スイッチングの原理

図15 (a) の波形に示すように、直流リアクトル L_d が接続されていない図4のフルブリッジ形の場合は、スイッチング時の電流が急変し、理論上 di/dt が無限大となるためスパイク電圧が発生しやすく、スイッチングロスも増加する。しかし、今回開発した図7に示すDCL型フルブリッジ高周波インバータ回路では、図15 (b) に示すように、電源に直列に接続した直流リアクトル L_d の作用により、ソフトスイッチングを実現している。

すなわち、このDCL型ZCSインバータ回路は、回路の対称性の条件より、

$$i_1 = i_2 = (i_d + i_o) / 2, \quad i_3 = i_4 = (i_d - i_o) / 2$$

の式が成り立つ。ここで、 i_d 、 i_o はリアクトル L_d 、 L_o の存在により、電流の連続性が成立する。その結果、スイッチングモード遷移において、IGBTモジュール内に接続されている回生ダイオード $D_3 \cdot D_4$ 導通時に $S_1 \cdot S_2$ をトリガしターンオンすると、 $D_3 \cdot D_4$ の電流 $i_3 \cdot i_4$ は瞬時にゼロにならずにある傾きを持って減少し、ZCSする。同時に $S_1 \cdot S_2$ の電流はZCSによるターンオンとなる。すなわち、 $S_1 \cdot S_2$ と $D_3 \cdot D_4$ が同時に導通する転流重複モードが存在するようになる。 $S_3 \cdot S_4$ のターンオン、 $D_1 \cdot D_2$ のターンオフにおいても同様の転流重複現象が発生し、ZCS動作となる。

つまり、図6の改良型と同様の原理としての転流重複現象利用によるすべてのスイッチング素子のZCS動作を実現することができ、スパイク電圧やスイッチングロスの抑制が可能となる。

この場合、リアクトル比 $\alpha = L_d / L_o$ が、ZCS諸特性及びスイッチング素子動作責務に大きく影響する。

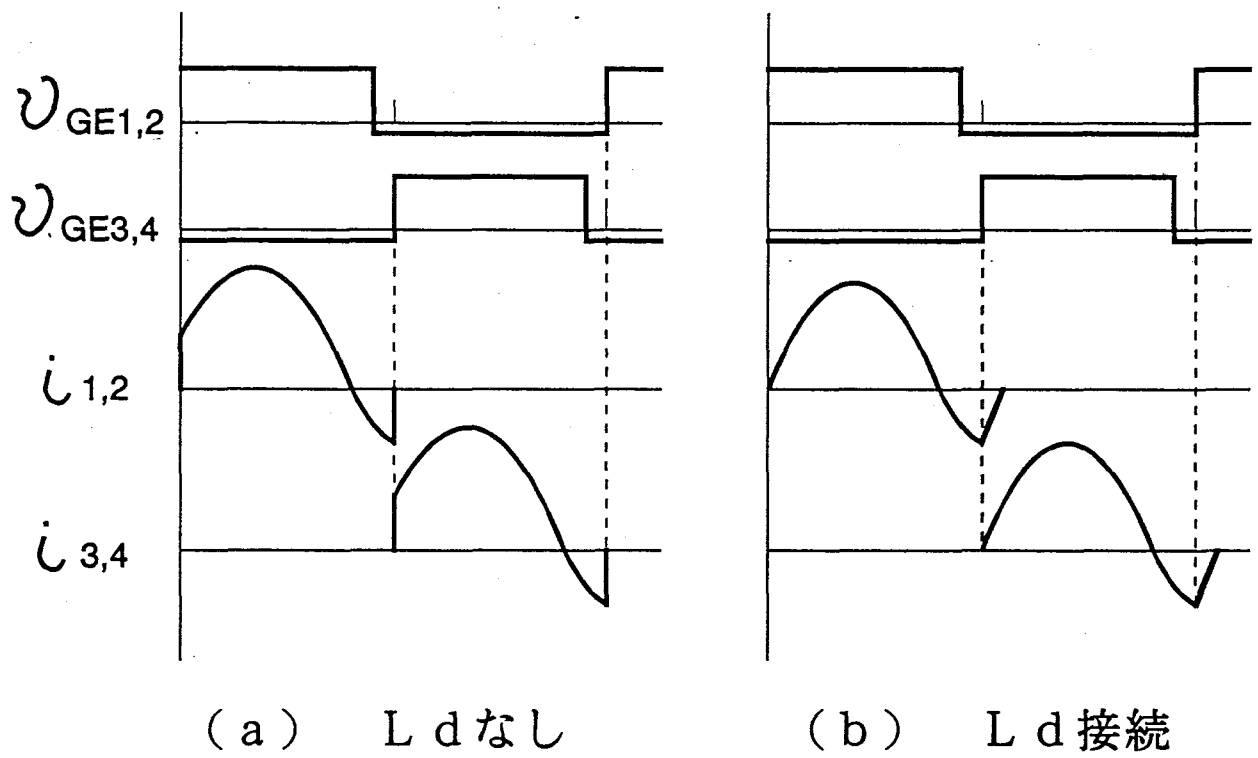


図15 ZCS動作の原理

第4章 高周波インバータの特性解析

4. 1 数値解析と状態方程式

4. 1. 1 回路方程式

回路の数値解析における状態変数の選定においては、状態変数の連続性を考慮してリアクトル L_o と、 $S_1 \sim S_4$ を流れる電流を $i_o, i_1 \sim i_4$ 、並びにキャパシタンス C_o の電圧 v_{co} を状態変数として各スイッチングモードの状態方程式を立てる。

各モードの回路方程式を以下に示す。

(a) $S_1 \cdot S_2$ 単流モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o}{dt} &= \frac{E_d - v_{co} - R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_1}{dt} &= \frac{E_d - v_{co} - R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_2}{dt} &= \frac{E_d - v_{co} - R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_3}{dt} &= 0 \quad \dots \dots \dots (1) \\
 \frac{di_4}{dt} &= 0 \\
 \frac{di_d}{dt} &= \frac{E_d - v_{co} - R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{dv_{co}}{dt} &= \frac{i_o}{C_o}
 \end{aligned}$$

(b) D1・D2単流モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o}{dt} &= \frac{E_d - v_{co} - R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_1}{dt} &= \frac{E_d - v_{co} - R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_2}{dt} &= \frac{E_d - v_{co} - R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_3}{dt} &= 0 \quad \dots \dots \dots (2) \\
 \frac{di_4}{dt} &= 0 \\
 \frac{di_d}{dt} &= \frac{E_d - v_{co} - R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{dv_{co}}{dt} &= \frac{i_o}{C_o}
 \end{aligned}$$

(c) S1・S2・D3・D4転流重複モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o}{dt} &= -\frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \\
 \frac{di_1}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_d}{L_d} - \frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \right) \\
 \frac{di_2}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_d}{L_d} - \frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \right) \\
 \frac{di_3}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_d}{L_d} + \frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \right) \quad \dots \dots \dots (3) \\
 \frac{di_4}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_d}{L_d} + \frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \right) \\
 \frac{di_d}{dt} &= \frac{E_d}{L_d} \\
 \frac{dv_{co}}{dt} &= \frac{i_o}{C_o}
 \end{aligned}$$

(d) S3・S4 単流モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o}{dt} &= -\frac{E_d + v_{co} + R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_1}{dt} &= 0 \\
 \frac{di_2}{dt} &= 0 \\
 \frac{di_3}{dt} &= \frac{E_d + v_{co} + R_o i_o}{L_d + L_o} \dots \dots \dots (4) \\
 \frac{di_4}{dt} &= \frac{E_d + v_{co} + R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_d}{dt} &= \frac{E_d + v_{co} + R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{dv_{co}}{dt} &= \frac{i_o}{C_o}
 \end{aligned}$$

(e) D3・D4 単流モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o}{dt} &= -\frac{E_d + v_{co} + R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_1}{dt} &= 0 \\
 \frac{di_2}{dt} &= 0 \\
 \frac{di_3}{dt} &= \frac{E_d + v_{co} + R_o i_o}{L_d + L_o} \dots \dots \dots (5) \\
 \frac{di_4}{dt} &= \frac{E_d + v_{co} + R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{di_d}{dt} &= \frac{E_d + v_{co} + R_o i_o}{L_d + L_o} \\
 \frac{dv_{co}}{dt} &= \frac{i_o}{C_o}
 \end{aligned}$$

(f) S3・S4・D1・D2 転流重複モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o}{dt} &= -\frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \\
 \frac{di_1}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_d}{L_d} - \frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \right) \\
 \frac{di_2}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_d}{L_d} - \frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \right) \\
 \frac{di_3}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_d}{L_d} + \frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \right) \dots\dots\dots (6) \\
 \frac{di_4}{dt} &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_d}{L_d} + \frac{v_{co} + R_o i_o}{L_o} \right) \\
 \frac{di_d}{dt} &= \frac{E_d}{L_d} \\
 \frac{dv_{co}}{dt} &= \frac{i_o}{C_o}
 \end{aligned}$$

4. 1. 2 無次元化パラメータの導入

高周波インバータをどのような負荷状態、周波数帯で動作させるのが適しているのかを、ZCS動作との関連に於いて把握しておく必要がある。その回路特性を解析するために、表1に示す無次元化パラメータを用いて、回路の数値解析を行った。数値解析には4次ルンゲクッタ数値解析法を用いて、始動から定常状態に至るまでの数値計算を実施し、各サイクルの v_{co}^* の初期値の変動幅が0.05%以内をもって定常状態として、定常諸特性量をプリントアウトした。

表1 無次元化パラメータ

【無次元化パラメータ】			
無次元化周波数	$\mu = 2\pi f_o \sqrt{LC}$	インダクタンス	$L = L_o$
無次元化抵抗	$\lambda = R / \sqrt{L/C}$ $\alpha = L_d / L$	キャパシタンス	$C = C_o$ $R = R_o$
【無次元化基準量】			
電圧	$E = E_d$	電流	$I = E / \sqrt{L/C}$
時間	$T = 1 / f_o$	電力	$P = E \cdot I$
		インピーダンス	$Z = \sqrt{L/C}$
【無次元化諸値】			
電圧	$v^*(z) = v(t) / E$	電流	$i^*(z) = i(t) / I$
電力	$P_o^* = P_o / P$	時間	$z = t / T = f_o \cdot t$

4. 1. 3 無次元化状態方程式

各モードの無次元化した状態方程式を下記に示す。

(a) S1・S2導通単流モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1-v_{co}^* - \lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{di_1^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1-v_{co}^* - \lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{di_2^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1-v_{co}^* - \lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{di_3^*}{dz} &= 0 \quad \dots \dots \dots (7) \\
 \frac{di_4^*}{dz} &= 0 \\
 \frac{di_d^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1-v_{co}^* - \lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{dv_{co}^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} i_o^*
 \end{aligned}$$

(b) D1・D2導通単流モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1-v_{co}^* - \lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{di_1^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1-v_{co}^* - \lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{di_2^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1-v_{co}^* - \lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{di_3^*}{dz} &= 0 \quad \dots \dots \dots (8) \\
 \frac{di_4^*}{dz} &= 0 \\
 \frac{di_d^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1-v_{co}^* - \lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{dv_{co}^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} i_o^*
 \end{aligned}$$

(c) S1・S2・D3・D4導通転流重複モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o^*}{dz} &= -\frac{2\pi}{\mu} (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \\
 \frac{di_1^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_2^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_3^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \right\} \quad \dots \dots \dots (9) \\
 \frac{di_4^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_d^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1}{\alpha} \\
 \frac{dv_{co}^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} i_o^*
 \end{aligned}$$

(d) S3・S4導通単流モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o^*}{dz} &= -\frac{2\pi}{\mu} \frac{1+v_{co}^*+\lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{di_1^*}{dz} &= 0 \\
 \frac{di_2^*}{dz} &= 0 \\
 \frac{di_3^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1+v_{co}^*+\lambda i_o^*}{\alpha+1} \dots\dots\dots (10) \\
 \frac{di_4^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1+v_{co}^*+\lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{di_d^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1+v_{co}^*+\lambda i_o^*}{\alpha+1} \\
 \frac{dv_{co}^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} i_o^*
 \end{aligned}$$

(e) D3・D4導通単流モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o^*}{dz} &= -\frac{2\pi}{\mu} (v_{co}^*+\lambda i_o^*) \\
 \frac{di_1^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^*+\lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_2^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^*+\lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_3^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^*+\lambda i_o^*) \right\} \dots\dots\dots (11) \\
 \frac{di_4^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^*+\lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_d^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1}{\alpha} \\
 \frac{dv_{co}^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} i_o^*
 \end{aligned}$$

(f) S3・S4・D1・D2導通転流重複モード

$$\begin{aligned}
 \frac{di_o^*}{dz} &= -\frac{2\pi}{\mu}(v_{co}^* + \lambda i_o^*) \\
 \frac{di_1^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_2^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_3^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \right\} \dots\dots\dots (12) \\
 \frac{di_4^*}{dz} &= \frac{\pi}{\mu} \left\{ \frac{1}{\alpha} - (v_{co}^* + \lambda i_o^*) \right\} \\
 \frac{di_d^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} \frac{1}{\alpha} \\
 \frac{dv_{co}^*}{dz} &= \frac{2\pi}{\mu} i_o^*
 \end{aligned}$$

4. 2 スイッチング動作モード遷移

特性解析を行うための数値理論解析において、プログラミングを行う際、スイッチにかかる電流、電圧の条件によるモードの移り変わりを明らかにする必要がある。

実際の回路動作における、各動作モードの過渡動作時のスイッチング動作モード遷移を以下に示す。表2に各時刻 Z における各スイッチのON、OFF状態と、各モードの略称を示す。なお、プログラムではD1-D4ダイオード導通モードに遷移した場合、そこでプログラムをSTOPさせ計算を終了させている。

表2 各モードの略称と各時刻におけるゲート信号のON、OFF

【各スイッチングモード】		【各モードの略称】
S1・S2単流モード		S1・S2
S3・S4単流モード		S3・S4
D1・D2単流モード		D1・D2
D3・D4単流モード		D3・D4
S1・S2・D3・D4重流モード		S1-D4
S3・S4・D1・D2重流モード		S3-D2
ダイオード導通モード		D1-D4
全スイッチOFFモード		OFF

【時間 Z におけるゲート信号のON、OFF】		
	S1・S2	S3・S4
$0 \leq Z < Z_1$	ON	OFF
$Z_1 \leq Z < Z_2$	OFF	OFF
$Z_2 \leq Z < (Z_1 + Z_2)$	OFF	ON
$(Z_1 + Z_2) \leq Z < 1.0$	OFF	OFF
$Z = 1.0$	ON	OFF

以下に各スイッチングモード遷移を示す。

[S1・S2]

・ $0 \leq Z < Z_1$

if $i_1 < 0$ and $v_{s3} < 0$ then stop(D1-D4)

if $i_1 < 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then D1・D2

if $i_1 \geq 0$ and $v_{s3} < 0$ then $v_{s3}, v_{s4} \rightarrow 0$ S1-D4

if $i_1 \geq 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then そのまま

・ $Z = Z_1$

if $i_1 < 0$ and $v_{s3} < 0$ then stop(D1-D4)

if $i_1 < 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then D1・D2

if $i_1 \geq 0$ then $i_3, i_4 \rightarrow -i_0$ $i_1, i_2 \rightarrow 0$ D3・D4

・ $Z_1 < Z$

なし

[S3・S4]

・ $Z < Z_2$

なし

・ $Z_2 \leq Z < (Z_1 + Z_2)$

if $i_3 < 0$ and $v_{s1} < 0$ then stop(D1-D4)

if $i_3 < 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then D3・D4

if $i_3 \geq 0$ and $v_{s1} < 0$ then $v_{s1}, v_{s2} \rightarrow 0$ S3-D2

if $i_3 \geq 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then そのまま

・ $Z = (Z_1 + Z_2)$

if $i_3 < 0$ and $v_{s1} < 0$ then stop(D1-D4)

if $i_3 < 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then D3・D4

if $i_3 \geq 0$ then $i_1, i_2 \rightarrow i_0$ $i_3, i_4 \rightarrow 0$ D1・D2

・ $(Z_1 + Z_2) < Z$

なし

[D 1 · D 2]

• $0 \leq Z < Z_1$

if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} < 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then	そのまま
if $i_1 > 0$ and $v_{s3} < 0$ then	S1 - D4
if $i_1 > 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then	S1 · S2

• $Z = Z_1$

if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} < 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then	そのまま
if $i_1 > 0$ then $i_3, i_4 \rightarrow -i_0$ $i_1, i_2 \rightarrow 0$	D3 · D4

• $Z_1 < Z < Z_2$

if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} < 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then	そのまま
if $i_1 > 0$ and $v_{s3} < 0$ then $i_1, i_2, i_0 \rightarrow 0$ $v_{s3}, v_{s4} \rightarrow 0$	D3 · D4
if $i_1 > 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then $i_1, i_2, i_0 \rightarrow 0$	OFF

• $Z = Z_2$

if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} < 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then	S3 - D2
if $i_1 > 0$ then $i_1, i_2, i_0 \rightarrow 0$	S3 · S4

• $Z_2 < Z < (Z_1 + Z_2)$

なし

• $(Z_1 + Z_2) \leq Z < 1.0$

if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} < 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then	そのまま
if $i_1 > 0$ then $i_1, i_2, i_0 \rightarrow 0$	OFF

• $Z = 1.0$

if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} < 0$ then $Z \rightarrow 0$	stop(D1 - D4)
if $i_1 \leq 0$ and $v_{s3} \geq 0$ then $Z \rightarrow 0$	そのまま
if $i_1 > 0$ then $Z \rightarrow 0$ $i_1, i_2, i_0 \rightarrow 0$	S1 · S2

[D3・D4]

・ $Z < Z1$

なし

・ $Z1 \leq Z < Z2$

if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} < 0$ then	stop(D1-D4)
if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then	そのまま
if $i_3 > 0$ and $v_{s1} < 0$ then $i_3, i_4, i_0 \rightarrow 0$ $v_{s1}, v_{s2} \rightarrow 0$	D1・D2
if $i_3 > 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then $i_3, i_4, i_0 \rightarrow 0$	OFF

・ $Z2 \leq Z < (Z1 + Z2)$

if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} < 0$ then	stop(D1-D4)
if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then	そのまま
if $i_3 > 0$ and $v_{s1} < 0$ then $v_{s1}, v_{s2} \rightarrow 0$	S3-D2
if $i_3 > 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then	S3・S4

・ $Z = (Z1 + Z2)$

if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} < 0$ then	stop(D1-D4)
if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then	そのまま
if $i_3 > 0$ and $v_{s1} < 0$ then $i_3, i_4 \rightarrow 0$ $i_1, i_2 \rightarrow i_0$ $v_{s1}, v_{s2} \rightarrow 0$	D1・D2
if $i_3 > 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then $i_1, i_2 \rightarrow i_0$ $i_3, i_4 \rightarrow 0$	D1・D2

・ $(Z1 + Z2) < Z < 1.0$

if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} < 0$ then	stop(D1-D4)
if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then	そのまま
if $i_3 > 0$ then $i_3, i_4, i_0 \rightarrow 0$	OFF

・ $Z = 1.0$

if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} < 0$ then $Z \rightarrow 0$	stop(D1-D4)
if $i_3 \leq 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then $Z \rightarrow 0$ $v_{s1}, v_{s2} \rightarrow 0$	S1-D4
if $i_3 > 0$ and $v_{s1} < 0$ then $Z \rightarrow 0$ $i_3, i_4, i_0 \rightarrow 0$ $v_{s1}, v_{s2} \rightarrow 0$	D1・D2
if $i_3 > 0$ and $v_{s1} \geq 0$ then $Z \rightarrow 0$ $i_3, i_4, i_0 \rightarrow 0$ $v_{s1}, v_{s2} \rightarrow 0$	S1・S2

[S 1 - D 4]

• $0 \leq Z < Z_1$

if $i_1 < 0$ and $i_3 \leq 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 < 0$ and $i_3 > 0$ then $i_3, i_4 \rightarrow 0$	D1 · D2
if $i_1 \geq 0$ and $i_3 \leq 0$ then	そのまま
if $i_1 \geq 0$ and $i_3 > 0$ then $i_3, i_4 \rightarrow 0$	S1 · S2

• $Z = Z_1$

if $i_1 < 0$ and $i_3 \leq 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 < 0$ and $i_3 > 0$ then $i_3, i_4 \rightarrow 0$	D1 · D2
if $i_1 \geq 0$ then $i_3, i_4 \rightarrow (i_d - i_o)/2$ $i_1, i_2 \rightarrow 0$	D3 · D4

• $Z_1 < Z \leq 1.0$

なし

[S 3 - D 2]

• $Z < Z_2$

なし

• $Z_2 \leq Z < (Z_1 + Z_2)$

if $i_1 \leq 0$ and $i_3 < 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 \leq 0$ and $i_3 \geq 0$ then	そのまま
if $i_1 > 0$ and $i_3 < 0$ then $i_1, i_2 \rightarrow 0$	D3 · D4
if $i_1 > 0$ and $i_3 \geq 0$ then $i_1, i_2 \rightarrow 0$	S3 · S4

• $Z = (Z_1 + Z_2)$

if $i_1 \leq 0$ and $i_3 < 0$ then	stop(D1 - D4)
if $i_1 > 0$ and $i_3 < 0$ then $i_1, i_2 \rightarrow 0$	D3 · D4
if $i_3 \geq 0$ then $i_1, i_2 \rightarrow (i_d + i_o)/2$ $i_3, i_4 \rightarrow 0$	D1 · D2

[OFF]

• $Z < Z_1$

なし

• $Z_1 \leq Z < Z_2$

なし

• $Z = Z_2$

if $v_{S1} < 0$ and $v_{S3} < 0$ then	$stop(D1 - D4)$
if $v_{S1} < 0$ and $v_{S3} \geq 0$ then $v_{S1}, v_{S2} \rightarrow 0$	$S3 - D2$
if $v_{S1} \geq 0$ and $v_{S3} < 0$ then $v_{S3}, v_{S4} \rightarrow 0$	$D3 \cdot D4$
if $v_{S1} \geq 0$ and $v_{S3} \geq 0$ then	$S3 \cdot S4$

• $Z_2 < Z < (Z_1 + Z_2)$

なし

• $(Z_1 + Z_2) \leq Z < 1.0$

if $v_{S1} < 0$ and $v_{S3} < 0$ then	$stop(D1 - D4)$
if $v_{S1} < 0$ and $v_{S3} \geq 0$ then $v_{S1}, v_{S2} \rightarrow 0$	$D1 \cdot D2$
if $v_{S1} \geq 0$ and $v_{S3} < 0$ then $v_{S3}, v_{S4} \rightarrow 0$	$D3 \cdot D4$
if $v_{S1} \geq 0$ and $v_{S3} \geq 0$ then	そのまま

• $Z = 1.0$

if $v_{S1} < 0$ and $v_{S3} < 0$ then $Z \rightarrow 0$	$stop(D1 - D4)$
if $v_{S1} < 0$ and $v_{S3} \geq 0$ then $Z \rightarrow 0$ $v_{S1}, v_{S2} \rightarrow 0$	$D1 \cdot D2$
if $v_{S1} \geq 0$ and $v_{S3} < 0$ then $Z \rightarrow 0$ $v_{S3}, v_{S4} \rightarrow 0$	$S1 - D4$
if $v_{S1} \geq 0$ and $v_{S3} \geq 0$ then $Z \rightarrow 0$	$S1 \cdot S2$

第5章 ZCS動作特性

5.1 リアクトル比 α の影響

5.5.1 リアクトル比 α の影響

図16に示すように、本方式インバータの場合、負荷リアクトル： $L_o (=L)$ と、電源： $E_d (=E)$ に直列に接続する直流リアクトル： L_d とのリアクトル比： $\alpha (=L_d/L)$ を大きくすることによって、ダイオードのターンオフ、主スイッチのターンオンにおける電流の傾き di/dt が小さくなり、ダイオード電流がゼロとなるまでの時間が図16に示すように $c < b < a$ と長くなる。つまり、リアクトル比を大きくすると、ダイオードと主スイッチが同時に導通する重複期間が長くなり、よりソフトなスイッチングが可能になる。ところが、転流重複期間が長すぎるとリアクトル L_d の抵抗成分による導通損失の増大、及びスイッチの電圧のピーク値も増加する。また、 L_o に対して L_d の値が、はるかに大きい場合、つまり、 α の値を極端に大きくした場合には、従来の電流形インバータとなり、入力電流は一方向に流れ、転流重複によるソフトスイッチングが行えなくなる。すなわち、この場合の直流リアクトルは、従来の電流型インバータの直流リアクトルとは異なり、直列共振に利用するための L_d となる。従って、 L_d の大きさは、ソフトスイッチングとしてのZCSを可能にする転流重複の効果が期待でき、導通損失も最小限度に抑えられる程度が望ましいと言える。

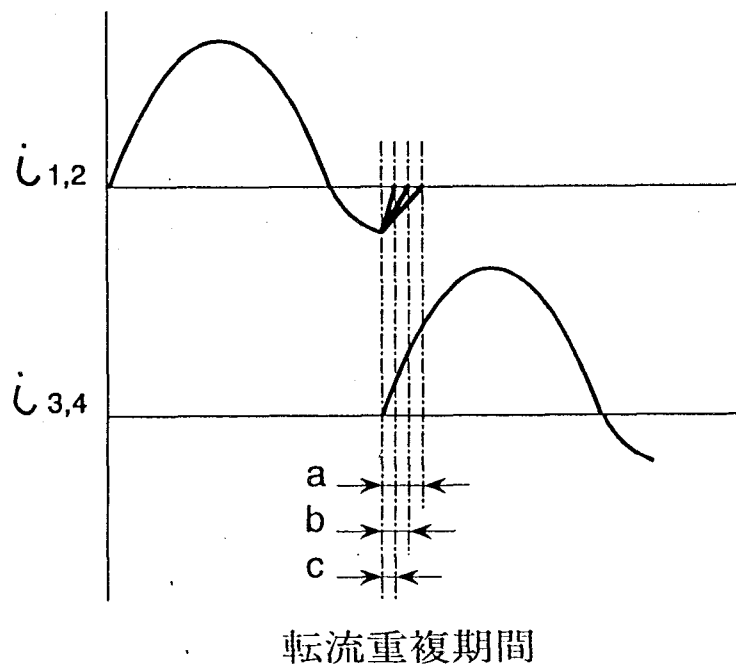


図16 リアクトル比変化による影響
(転流重複期間 $a > b > c$)

図17～図19に、リアクトル比 α を変化させたときの各(μ 、 λ)の値における、ZCS動作領域内のスイッチ電圧最大値： V_{smax}^* 、スイッチ電流最大値： I_{smax}^* 及び出力電力： P_o^* の特性値変化を示す。

まず、図17より、 α の変化に対して I_{smax}^* の変化は少ない。また、 λ が大きくなるにつれ、 μ の変化に対する I_{smax}^* の変化は小さくなっているうえ、全体的に I_{smax}^* の値も、小さくなっている。特に μ の値が大きいほど、 I_{smax}^* の値が下がっている。

次に、図18からは、 α 、 μ が、それぞれ大きくなるほど、 V_{smax}^* も大きくなっている。また、 λ が大きくなるに従って、 μ 変化に対する V_{smax}^* の変化が小さくなり、全体的に V_{smax}^* の値も小さくなっている。特に、 μ の値が大きいほど、その傾向が顕著に現れている。

また、図19の P_o^* について見ると、 μ の小さい範囲では、 λ や、 α の変化に対する影響はあまりないが、 μ が大きく、 λ が小さいとき、 α が大きくなるにつれ、 P_o^* も大きくなる。

3つの図を比較すると、各特性値(I_{smax}^* 、 V_{smax}^* 、 P_o^*)とも、 λ が小さいときに、比較的大きな値を取ることがわかる。また、 I_{smax}^* に対しての影響は少ないが、 α が大きくなるにつれ、 V_{smax}^* と P_o^* は大きくなる。したがって、 α と μ を大きく、 λ を小さくとると、出力を大きくとる事ができる。しかし、一般に α の値を大きくしていくと、スイッチング素子の動作責務が厳しくなる傾向があり、またリアクトルにおける導通損失も増加するので、 α の選定においては、負荷定格出力、使用するスイッチング素子定格等を十分検討して決定する必要がある。

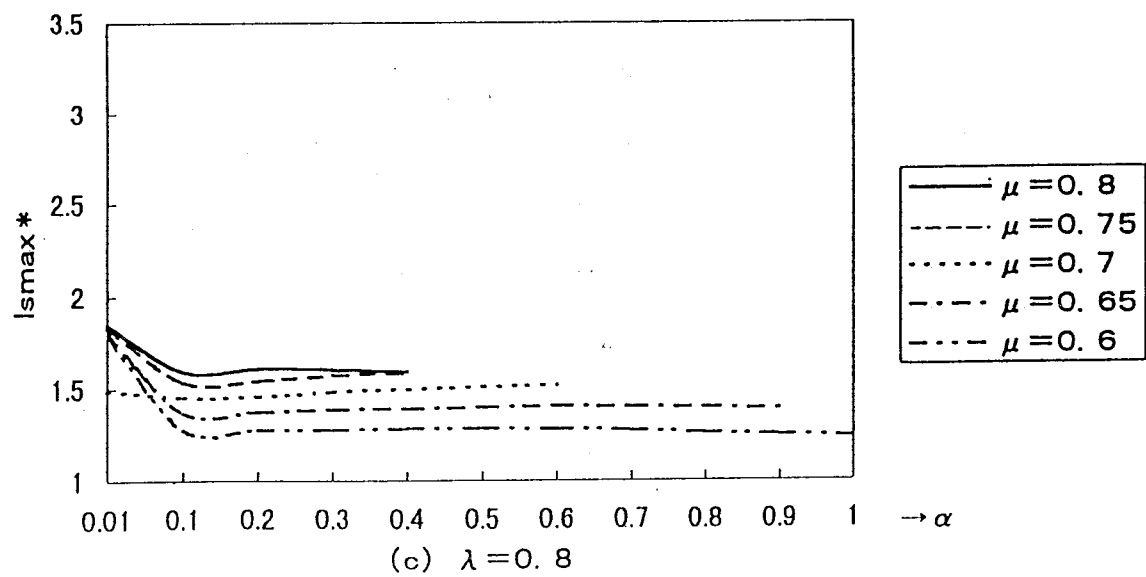
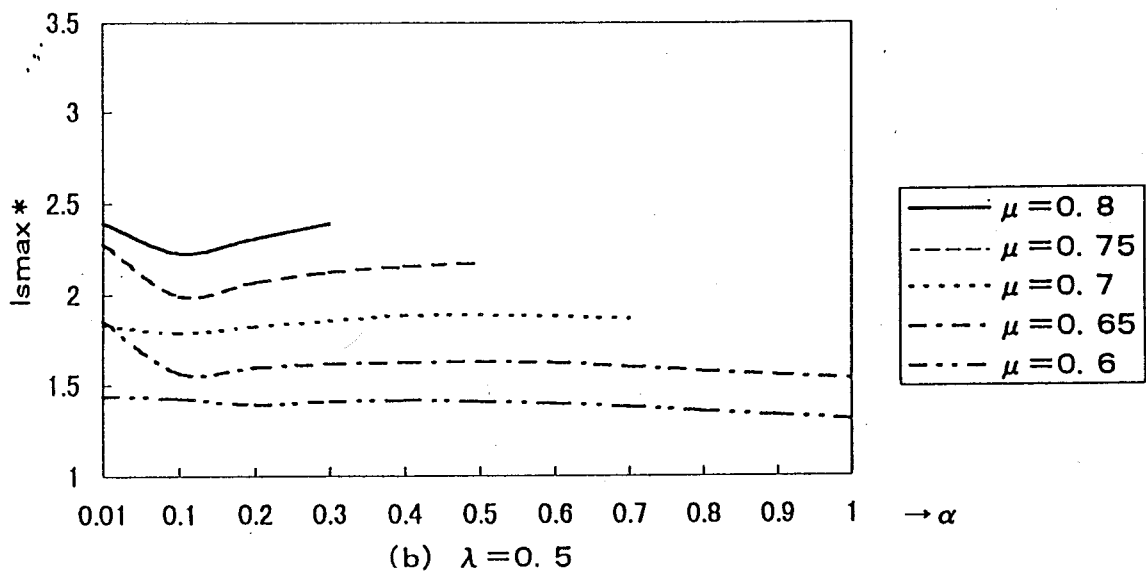
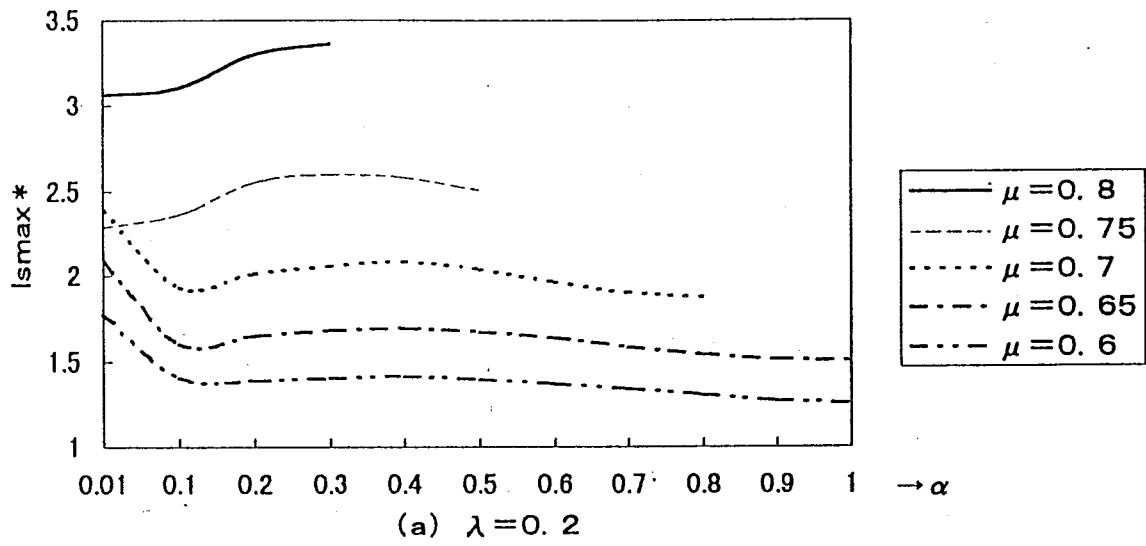
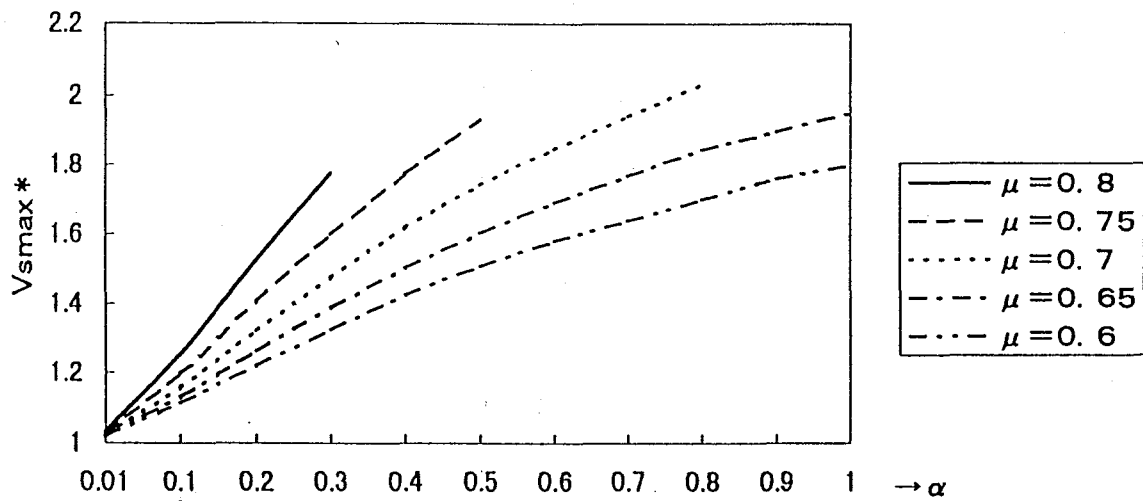
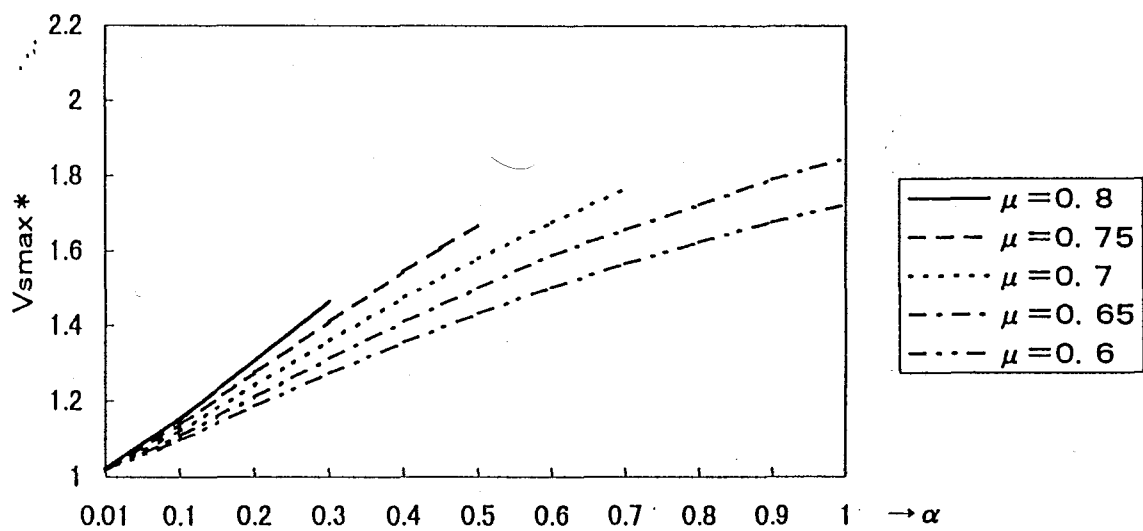


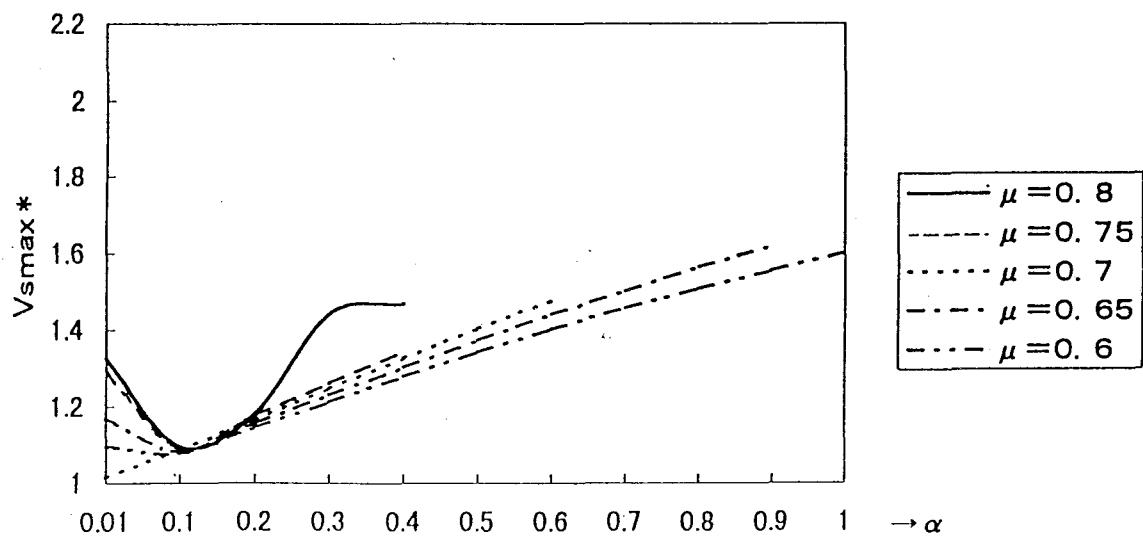
図 17 $\alpha - I_{\max}^*$ 特性



(a) $\lambda = 0.2$



(b) $\lambda = 0.5$



(c) $\lambda = 0.8$

図18 $\alpha - V_{smx}^*$ 特性

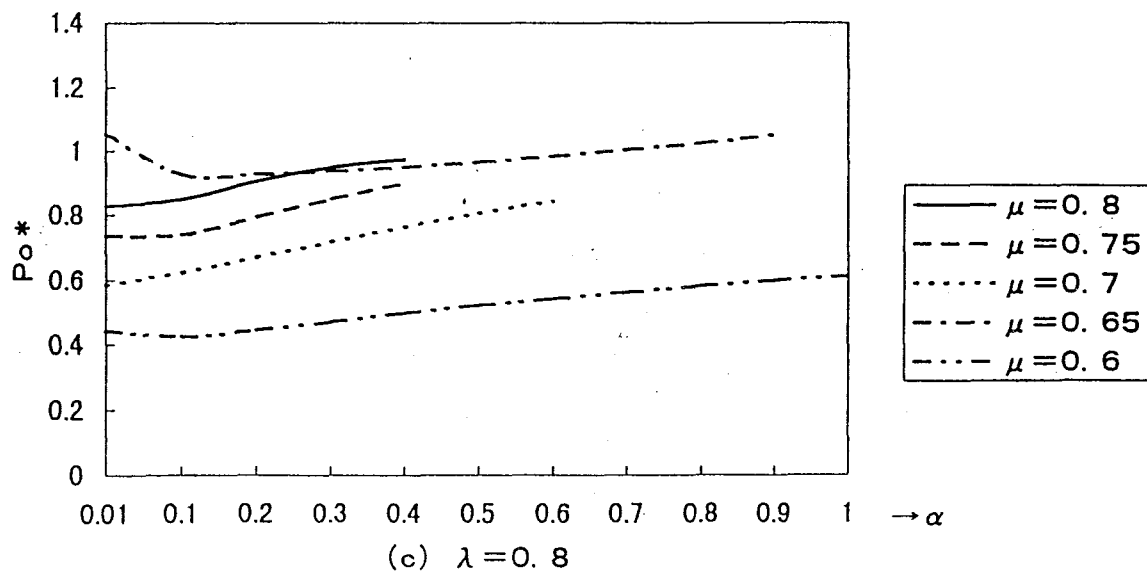
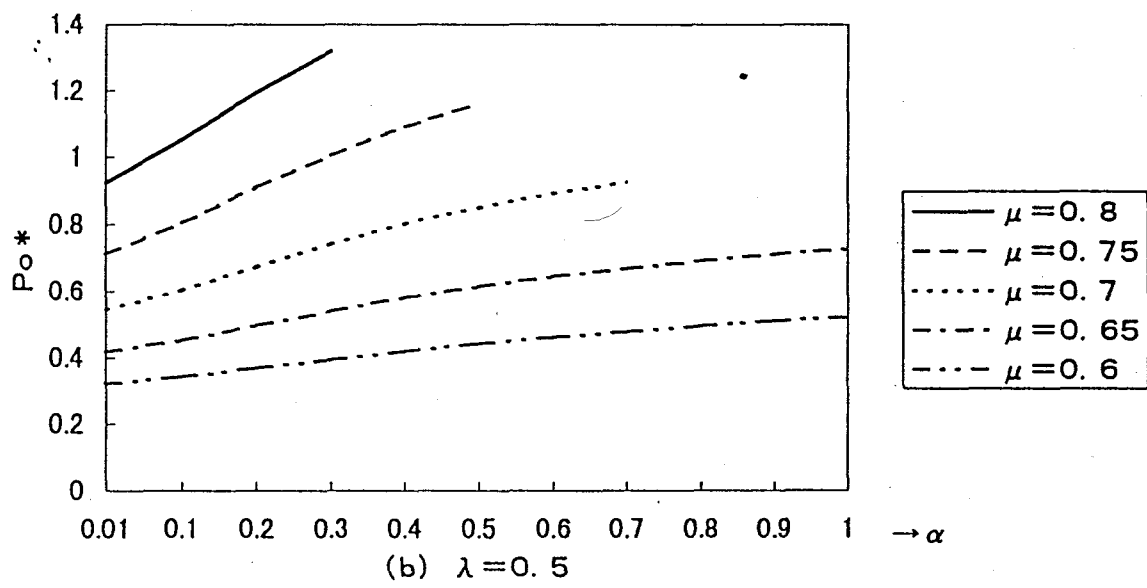
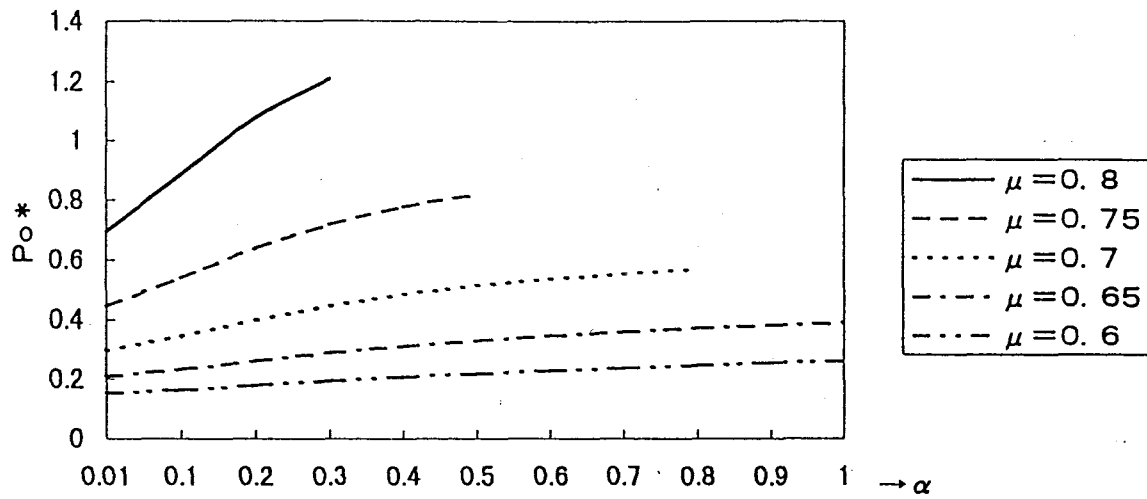


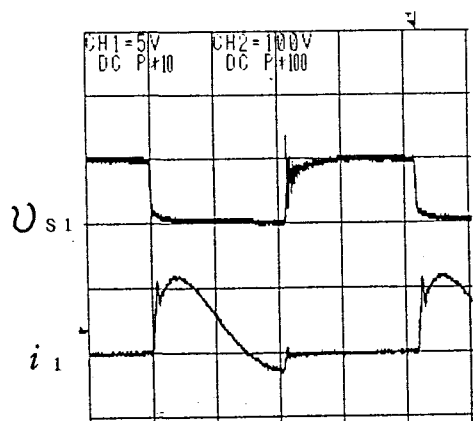
図 19 $\alpha - P o^*$ 特性

5. 1. 2 動作波形比較

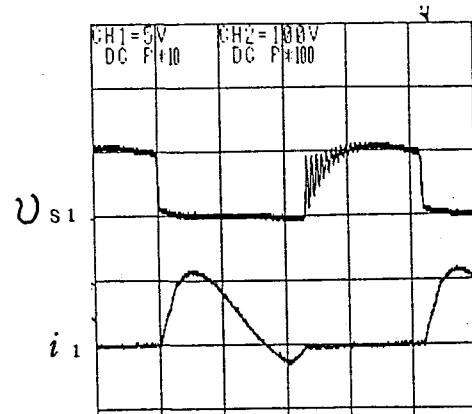
次に、図20にPM低減用誘導加熱負荷において、リアクトル比 α を変化したときの実験動作波形を示す。この図の(a)～(e)は、 $\alpha = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ における、スイッチ電圧： v_{s1} 、スイッチ電流： i_1 の波形である。

図20より、 α の値が大きくなるにつれ、ターンオン時には、電流 i_1 の傾きが緩やかになっており、サージ電流も抑制されている。また、ターンオフ時をみると、 $\alpha = 0$ のとき、ダイオードを流れる電流 i_1 の傾き di/dt が大きく、急激に減少しており、電圧 v_{s1} にスパイク電圧が発生しているが、 α が大きくなるにしたがい、ダイオードを流れる電流の減少の仕方も緩やかになり、転流重複期間が長くなっている。それに伴い、電圧 v_{s1} の立ち上がりも緩やかになり、スパイク電圧の発生は抑制されている。

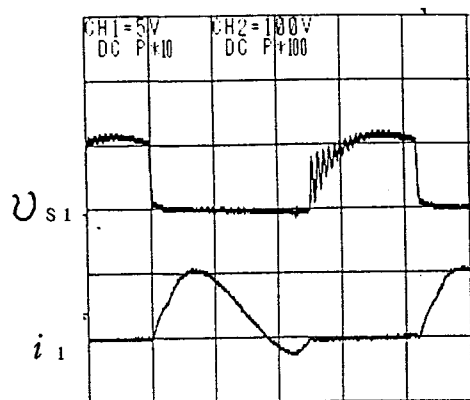
この様にリアクトル α の増加に伴い、ターンオン、ターンオフ電流の di/dt は小さくなり、スパイク電圧も抑制され、ZCS動作の効果は顕著となることが、実験波形の比較からわかる。



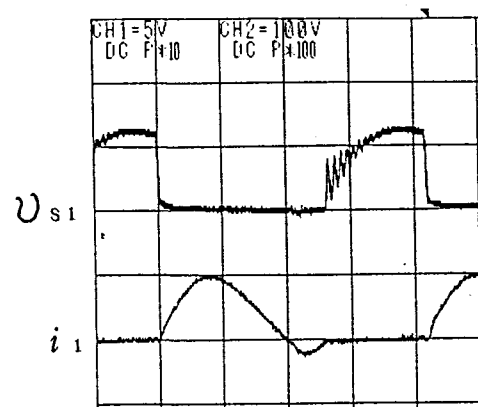
(a) $\alpha = 0$ ($E_d = 93.8V$)



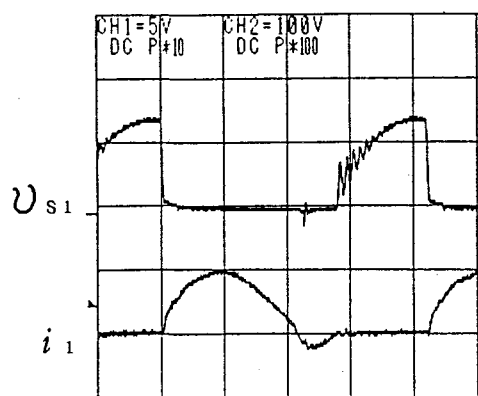
(b) $\alpha = 0.1$ ($E_d = 88.7V$)



(c) $\alpha = 0.2$ ($E_d = 83.8V$)



(d) $\alpha = 0.3$ ($E_d = 79.5V$)



(e) $\alpha = 0.5$ ($E_d = 77.2V$)

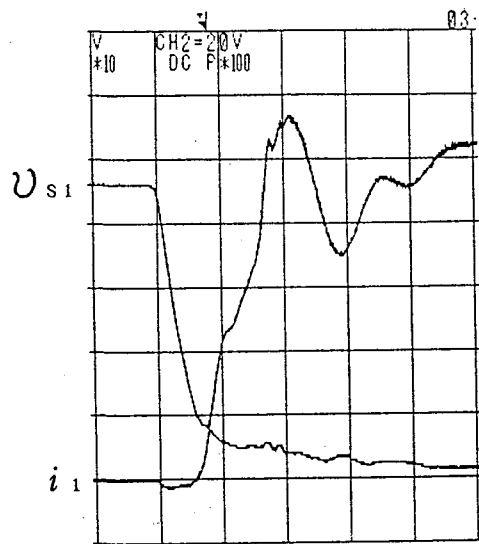
$$\left[\begin{array}{l} U_{s1} : 100 \text{ V/div} \\ i_1 : 6 \text{ A/div} \\ 10 \mu\text{s/div} \\ \\ L_o = 211 \mu\text{H} \\ C_o = 0.2 \mu\text{F} \\ f_o = 23.9 \text{ kHz} \end{array} \right]$$

図 20 リアクトル比変化 (α 変化) 動作波形

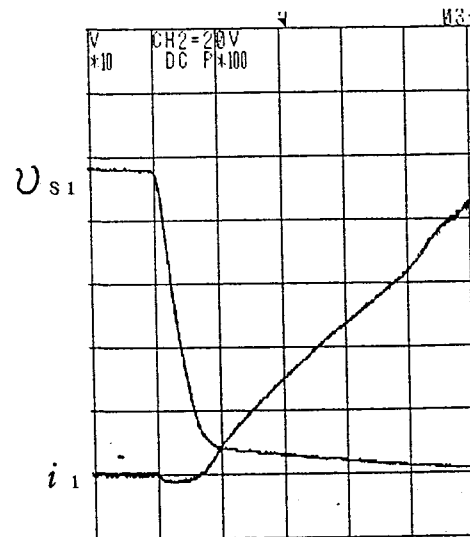
5. 1. 3 ターンオン・オフ波形比較

図 2 1 と図 2 2 は、 α を変化させたときのターンオンとターンオフの波形である。それぞれ、(a) ～ (e) は、 $\alpha = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5$ を表している。

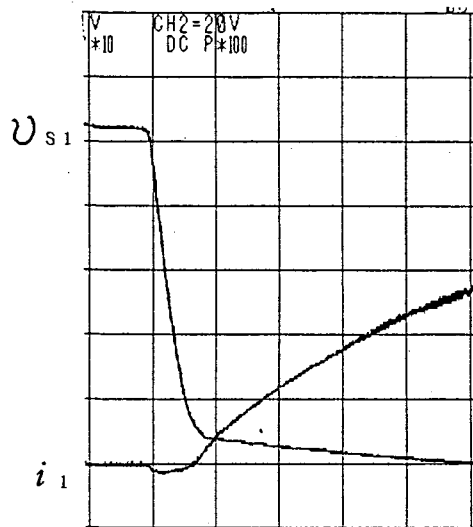
α が大きくなるにつれ、図 2 1 - (a) の $\alpha = 0$ にみられる様な、ターンオン時の電圧 v_{s1} の細かい振動や、電流 i_1 の急激な立ち上がりとそれに伴う振動、つまり、サージ電流が抑えられている。同じく、図 2 2 のターンオフ時は、 v_{s1} のスパイク電圧が抑制されるとともに、電圧の振動と、それに伴う電流 i_1 の振動も抑制され、振動周期も長く緩やかになっている。すなわち、リアクトル比 α の増加は、ダイオードのターンオフにおける di/dt を小さくする事によるソフトリカバリ効果があり、リカバリ電流に起因する振動現象、サージ、ノイズや、スイッチング損失等を抑制、低減できることが明らかとなった。



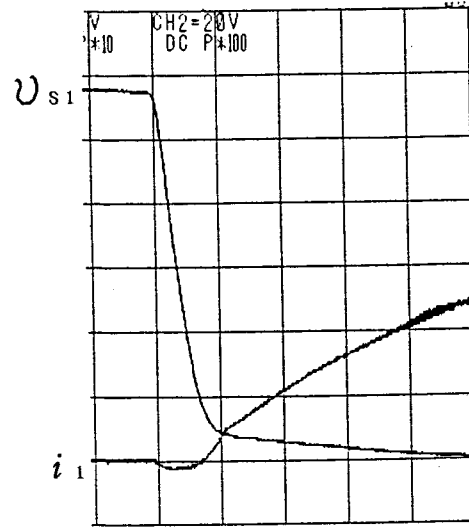
(a) $\alpha = 0$ ($E_d = 93.8V$)



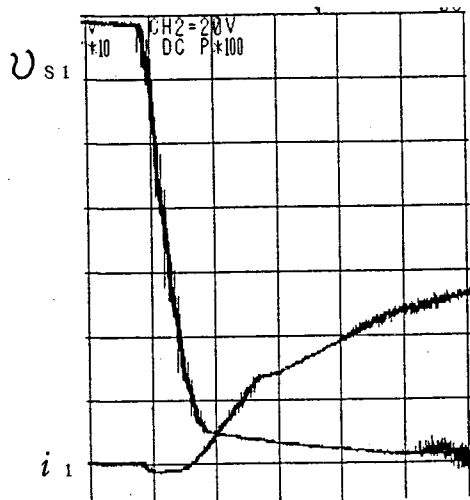
(b) $\alpha = 0.1$ ($E_d = 88.7V$)



(c) $\alpha = 0.2$ ($E_d = 83.8V$)



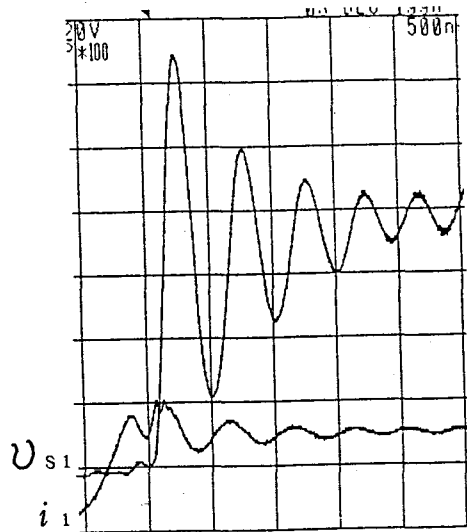
(d) $\alpha = 0.3$ ($E_d = 79.5V$)



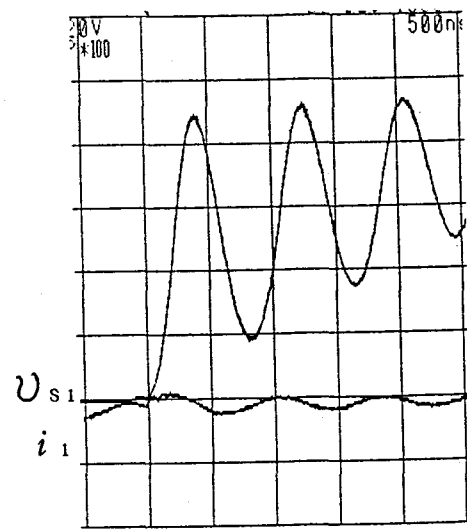
(e) $\alpha = 0.5$ ($E_d = 77.2V$)

$$\left[\begin{array}{l} U_{s1} : 20 \text{ V/div} \\ i_1 : 1.2 \text{ A/div} \\ 500 \text{ ns/div} \\ L_o = 211 \text{ } \mu\text{H} \\ C_o = 0.2 \text{ } \mu\text{F} \\ f_o = 23.9 \text{ kHz} \end{array} \right]$$

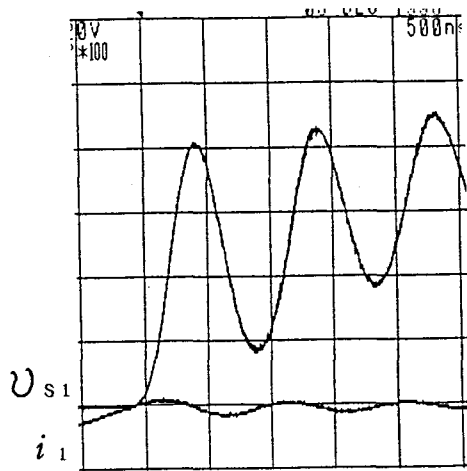
図 2 1 ターンオン波形



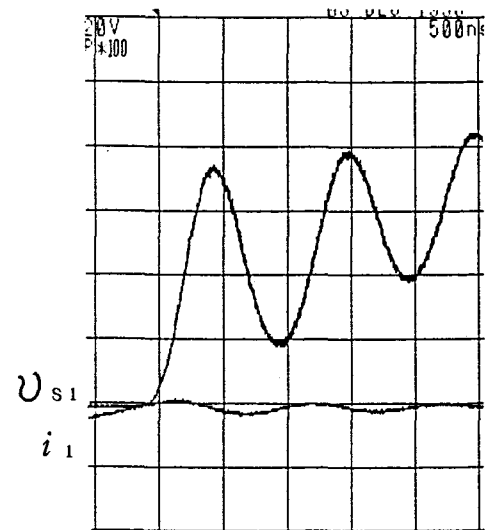
(a) $\alpha = 0$ ($Ed=93.8V$)



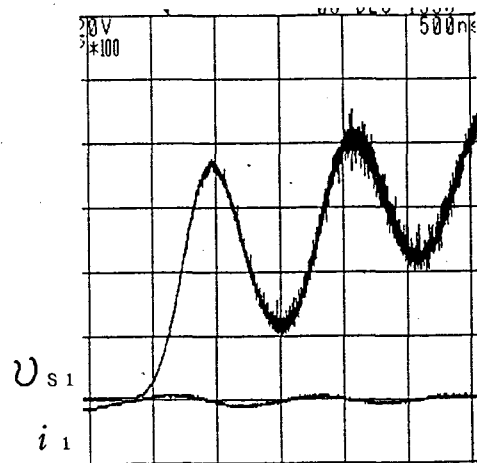
(b) $\alpha = 0.1$ ($Ed=88.7V$)



(c) $\alpha = 0.2$ ($Ed=83.8V$)



(d) $\alpha = 0.3$ ($Ed=79.5V$)



(e) $\alpha = 0.5$ ($Ed=77.2V$)

$$\left[\begin{array}{l} U_{s1} : 20 \text{ V/div} \\ i_1 : 1.2 \text{ A/div} \\ 500 \text{ ns/div} \\ L_o = 211 \text{ } \mu\text{H} \\ C_o = 0.2 \text{ } \mu\text{F} \\ f_o = 23.9 \text{ kHz} \end{array} \right]$$

図 2 2 ターンオフ波形

5. 1. 4 スイッチング損失

スイッチング素子である I G B T を高周波で駆動すると、高周波スイッチングによるスイッチング損失が、総合損失を左右する。

そのため、ここではリアクトル比 α の違いによるスイッチング損失を求める。

スイッチング損失は、主として、スイッチのターンオン、ターンオフ時に発生する損失である。ここで、ターンオン、ターンオフ時間は、以下のように定義される。

- ・ ターンオン

スイッチ電圧波形が最大振幅の 90% から 10% まで減少するのに要する時間

- ・ ターンオフ

スイッチ電圧波形が最大振幅の 10% から 90% まで増加するのに要する時間

これより、リアクトル比: α ($= L_d / L$) の違いによるターンオンとターンオフ時のスイッチング損失を求めた。

しかし、今回の D C L 型回路では、ターンオフ時のスイッチング損失は電流と電圧の重複部分が極めて小さかった為、算出できなかった。よって、ターンオン時のスイッチング損失を $\int i_s(t) \times v_s(t) dt$ より求めると、以下のようになった。

$$\alpha = 0 \quad \dots \dots \dots P_{on} = 18.71 \text{ (W)}$$

$$\alpha = 0.1 \quad \dots \dots \dots P_{on} = 11.37 \text{ (W)}$$

$$\alpha = 0.2 \quad \dots \dots \dots P_{on} = 6.97 \text{ (W)}$$

$$\alpha = 0.3 \quad \dots \dots \dots P_{on} = 5.84 \text{ (W)}$$

$$\alpha = 0.5 \quad \dots \dots \dots P_{on} = 6.87 \text{ (W)}$$

直流リアクトル L_d の大小がターンオン損失に影響している。 α が大きくなると損失は減っているが、 $\alpha = 0.5$ になると、逆に増えてしまっている。これは、 α が大きすぎると、スイッチのターンオフにおける電圧の最大値 V_{smax} が上昇することによる影響と考えられる。

以上のことから、単純構成のフルブリッジ型 ($\alpha = 0$) と DCL 型 ($\alpha = 0.1$ から 0.5) の動作波形を比較すると、DCL 型は ZCS 動作によってソフトスイッチングが実現しており、主スイッチのターンオンにおけるスパイク電圧を抑制している。電流波形は正弦波に近くなっている、主スイッチ電流に対するダイオード電流の比率も少なく、理想的な波形であると言える。

また、 α が大きくなるとスパイク電圧が減少し、転流重複期間も増えソフトスイッチングとしての ZCS の効果も大きくなることが確認できる。その結果、スイッチング時のスイッチング素子における電流、電圧の急激な変化を抑えることができ、過電流、過電圧も防ぐことができる。さらには、スイッチング損失やノイズ、サージ、振動現象等の抑制、低減もできるので、スイッチング素子の保護の観点からも、有効であるといえる。しかし、リアクトル L_d における導通損失の増加や、スイッチ電圧最大値上昇の影響もでてくる。従って α の最適値は、ZCS の効果を確保しなおかつ導通損失を抑える観点から、 $\alpha = 0.1$ 前後が妥当な値であると言えよう。

5. 2 ZCS動作領域

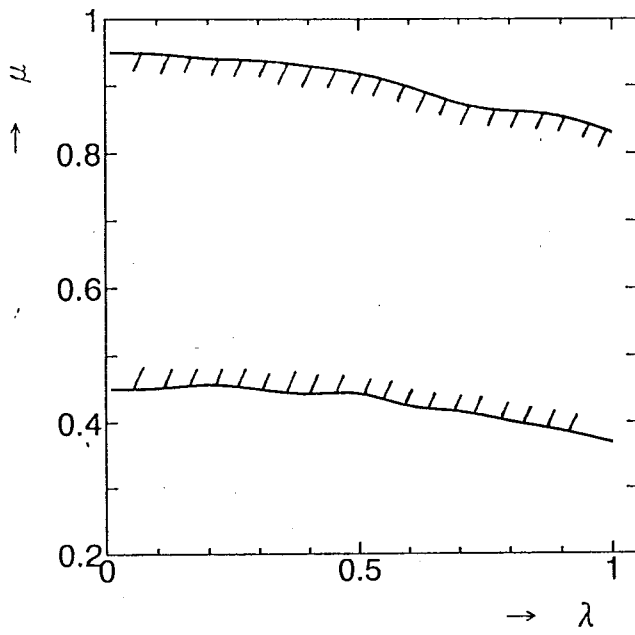
回路設計により、高周波誘導加熱電源を実際に製作するためには、ZCS特性を考慮して、各回路コンポーネントのパラメータを決める必要がある。これらのパラメータを選定するに当たり、数値解析に基づく回路の特性解析をおこなう。その第一段階としてZCS動作領域を調べた。

インバータは高周波化することにより、共振による回路コンポーネントや、トランスの小型軽量化が可能となる。しかし高周波化に伴い、一周に占めるスイッチング時間の割合が大きくなるため、スイッチング損失が増加し、浮遊インダクタンス成分によるスパイク電圧が発生しやすくなる、といった問題も生じてくるため、その対策が重要となる。本論文では、ZCS動作によるソフトスイッチングを実現し、スイッチングロスやスパイク電圧を抑制している。このZCS動作を実現するためには、回路をZCS動作領域内で運転させる必要がある。このZCS動作領域内であれば、負荷変動（ λ 変化）や周波数制御（ μ 変化）においても、スイッチング電流のZCS動作が可能となる。ZCS動作領域内における μ 、 λ のパラメータを選定することにより、ZCS動作としてのソフトスイッチングが保証される。

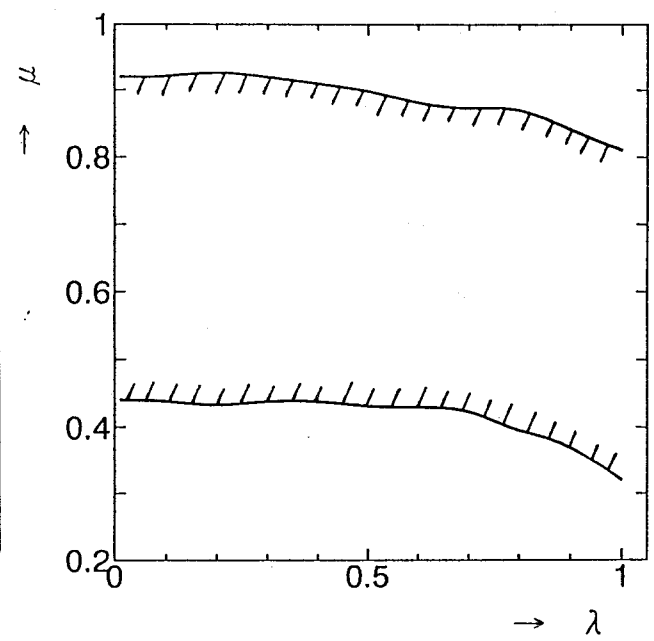
図23の(a)～(d)に、リアクトル比： $\alpha (=L_d/L)$ を0.05、0.1、0.3及び0.6と変化させたときの、無次元化 $\mu-\lambda$ 平面における、ソフトスイッチングとしてのZCS動作領域を示す。なお、ZCS動作領域の数値計算において、ここで求めたZCS動作領域は、定常ZCS動作領域であり、始動時過渡動作における非ZCS動作で出発しても、定常状態において、ZCS動作が確保される領域を示している。

図23の(a)～(d)において、無次元化周波数 μ については、 α の値が大きくなるにつれ、ZCS動作領域が狭くなっており、さらに上限、下限共に μ の値が小さくなっている。しかし、各 α とも μ の範囲に対するZCS領域の広さは、ほとんど変わらない。また、無次元化負荷抵抗 λ に対する領域変化は少ない。つまりこの回路は、 α の変化によって周波数帯は変化するが、比較的広い範囲でのZCS動作が可能であることがわかる。

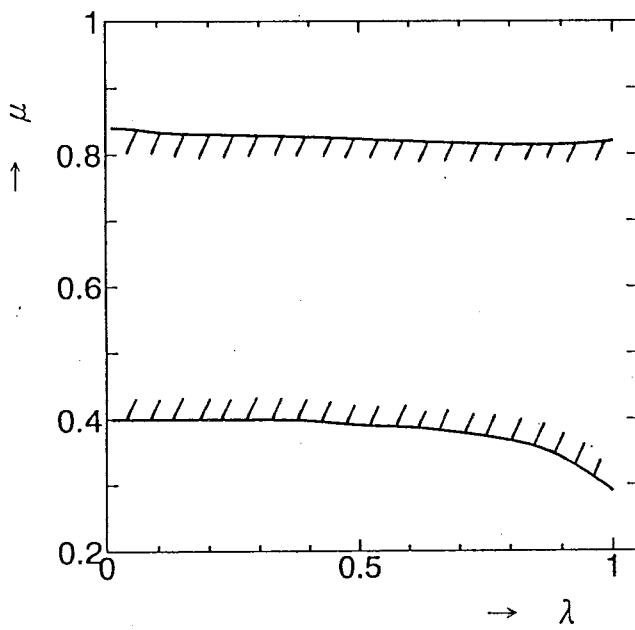
負荷変動や周波数変動を考慮した場合、より広い動作領域である方が望ましい。よって、回路設計では、ある程度の広さのZCS動作領域を確保し、リアクトルにおける導通損失等も抑えられる α を選定する必要がある。



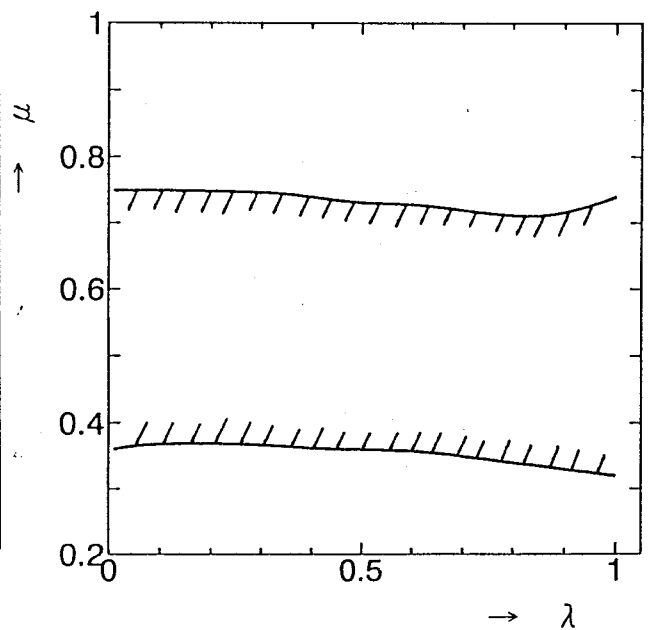
(a) $\alpha = 0.05$



(b) $\alpha = 0.1$



(c) $\alpha = 0.3$



(d) $\alpha = 0.6$

図 2.3 ZCS動作領域

5. 3 諸特性分布

一般に回路の共振を利用した高周波インバータでは、スイッチング素子動作責務として電圧や電流の最大値が過大になる傾向にあり、その値を把握しておくことが重要となる。即ち、ここで述べる特性分布とは、前に述べたZCS動作領域内のスイッチング動作責務、出力としての各特性値ごとに同じ値を結んで表した等値曲線を示す。

高周波誘導加熱システムの駆動においては、高周波インバータをZCS動作領域内で安定動作させるために V_{smax}^* 、 I_{smax}^* 、 P_o^* のそれぞれの特性分布を把握する必要がある。図24～図27、図28～図31、図32～図35にそれぞれ $\alpha = 0.05$ 、 0.1 、 0.3 、 0.6 における各特性値の分布を示す。

それぞれの項目について、比較していく。

まず、図24～図27の V_{smax}^* について見ると、それぞれ μ が大きく、 λ が小さくなるにつれて特性値が大きくなる傾向にあり、図27の $\alpha = 0.6$ においては、 $\mu > 0.7$ 、 $\lambda < 0.3$ の領域で、 V_{smax}^* が電源電圧の2倍近くになる。また、 α が大きくなるに連れて同一 (μ, λ) における V_{smax}^* の特性値も大きくなる傾向があり、さらに、図24の $\alpha = 0.05$ では特性値が1.03～1.17なのに対し、図27の $\alpha = 0.6$ では1.3～1.9と、各 α の値に対する V_{smax}^* の変動幅も、大きくなっている。

次に、図28～図31の I_{smax}^* について見ると、特性曲線は、 λ の変化に対してあまり変化はしないが、逆に μ が変化すると特性値の変化が著しい。つまり、負荷変動に対しては安定であるが、周波数変動に対して影響を受けやすいと言える。また、 α が大きくなるに連れて、同一 (μ, λ) における I_{smax}^* 特性値は、小さくなる傾向があり、その上、同じ領域において、図28の $\alpha = 0.05$ は特性値が1.1～6.0まで変化するのに対し、図31の $\alpha = 0.6$ では1.1～2.0しか変化しないことから、 α は大きい方が I_{smax}^* を低く抑えることができる。

図32～図35の P_o^* については、 μ の変化に対して、特性値の変化が大きい
が、特性曲線が λ 軸に沿う傾向があり、負荷変動に対して比較的、安定な出力を
得られる。しかし、各 α の値とも、 $\mu > 0.7$ 、 $\lambda < 0.1$ の領域では、 μ 変化、
 λ 変化、共に、特性値が特に著しく変化するので、回路設計において注意を要す
る。また、図32の $\alpha = 0.05$ では、最大特性値が2.5だったのに対し、図
35の $\alpha = 0.6$ になると0.8と小さくなっており、 α が大きくなるに連れて、
同一(μ 、 λ)における P_o^* 特性値も、小さくなる傾向がある。

誘導加熱においては、ジュール熱は電流の二乗に比例するため、より高出力で
加熱するために P_o を大きくする必要がある。しかし、スイッチ保護の観点から、
 V_{smax} 、 I_{smax} は、なるべく低くしなければならない。

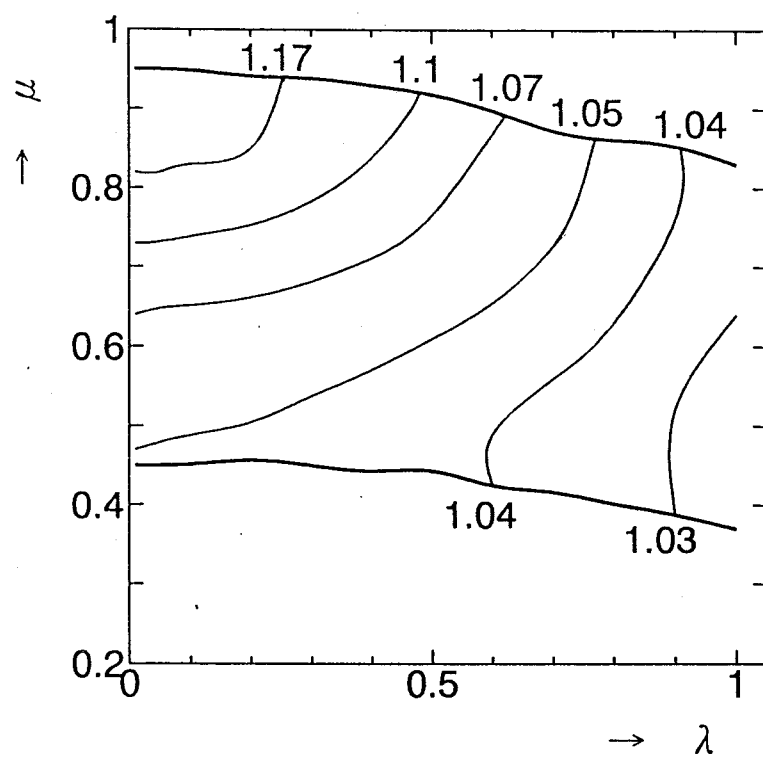


図 24 V_{\max}^* ($\alpha = 0.05$)

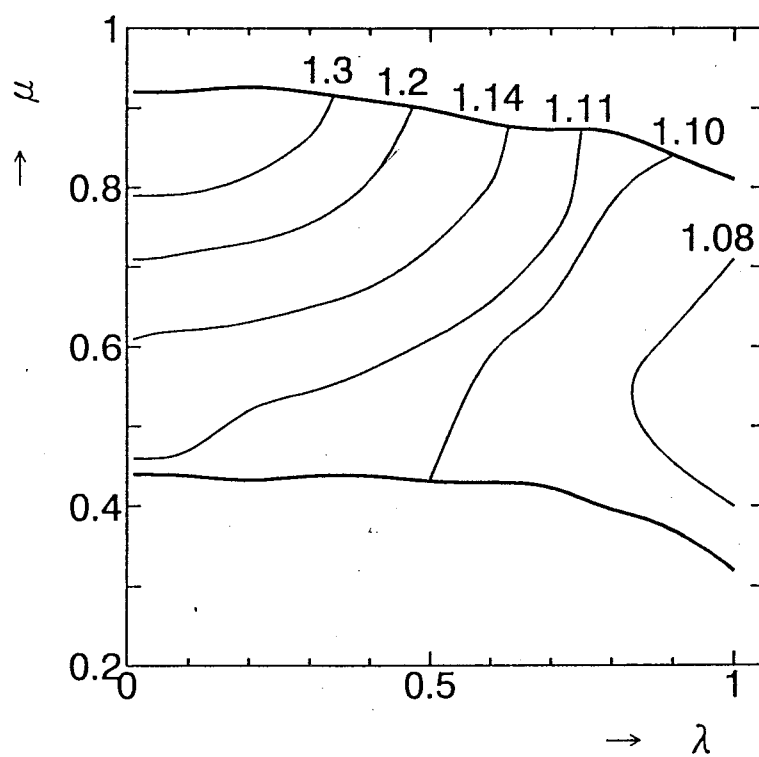


図 25 V_{\max}^* ($\alpha = 0.1$)

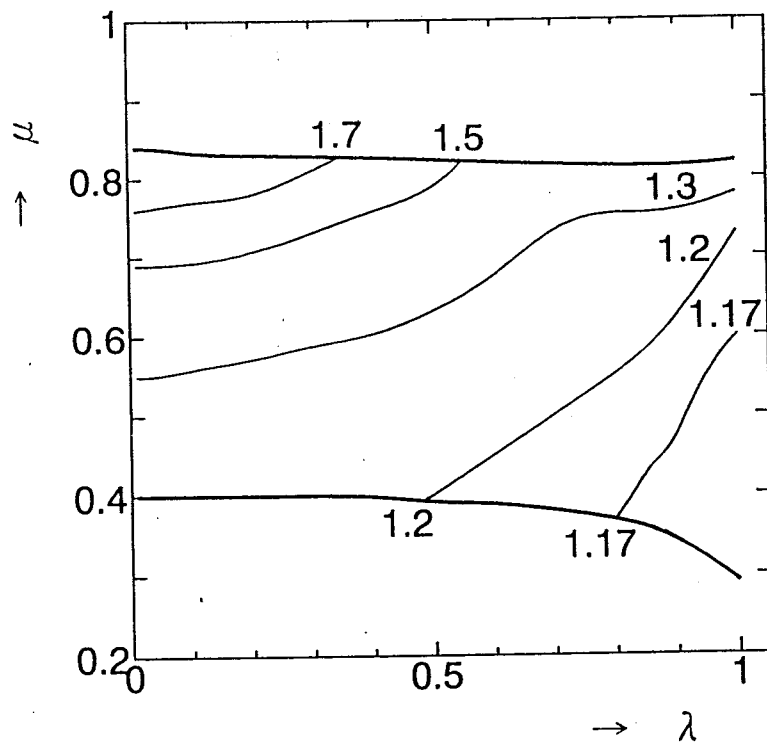


図 26 $V s m a x^* (\alpha = 0.3)$

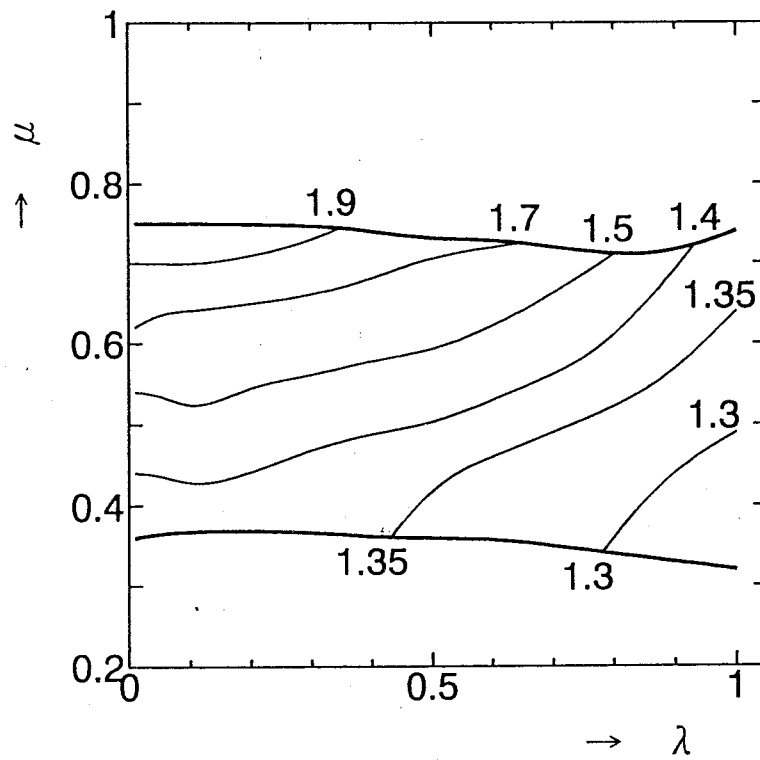


図 27 $V s m a x^* (\alpha = 0.6)$

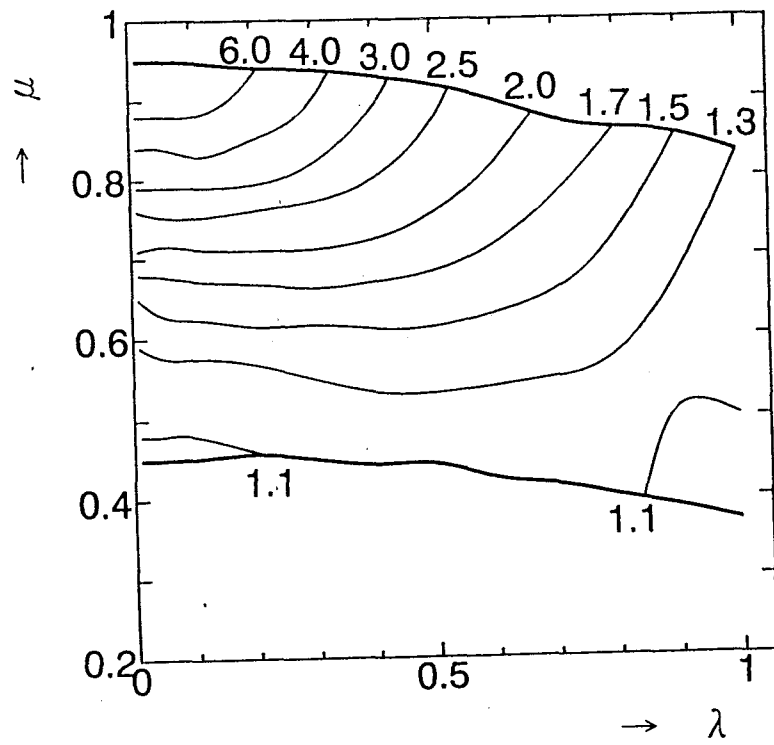


図 28 $I_{\text{smax}}^* (\alpha = 0.05)$

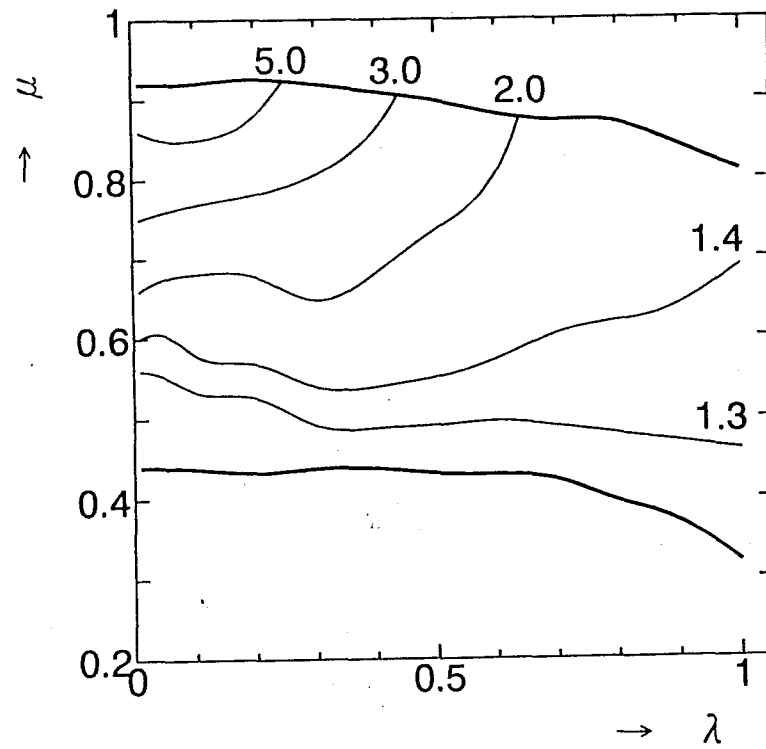


図 29 $I_{\text{smax}}^* (\alpha = 0.1)$

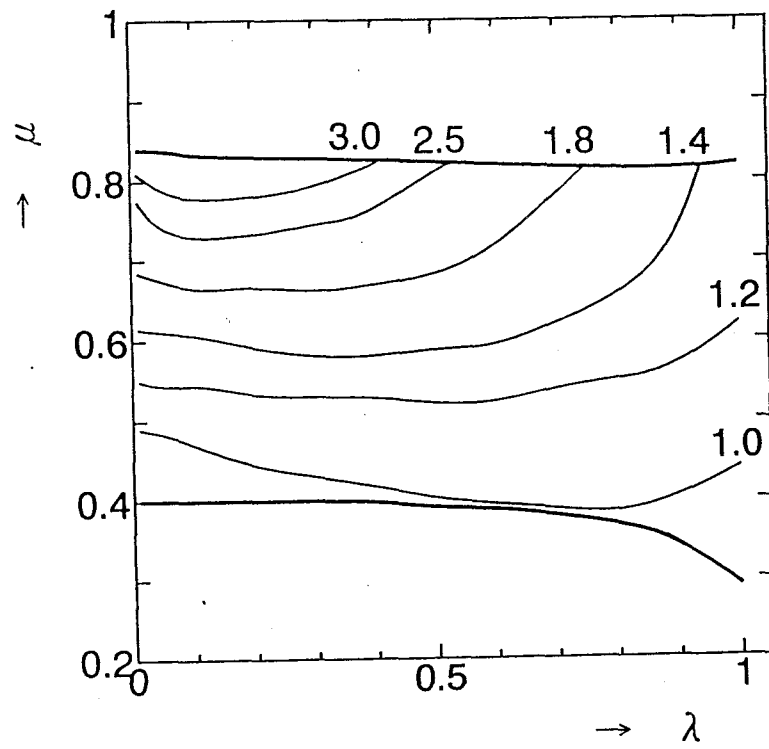


図 30 $I s m a x^* (\alpha = 0.3)$

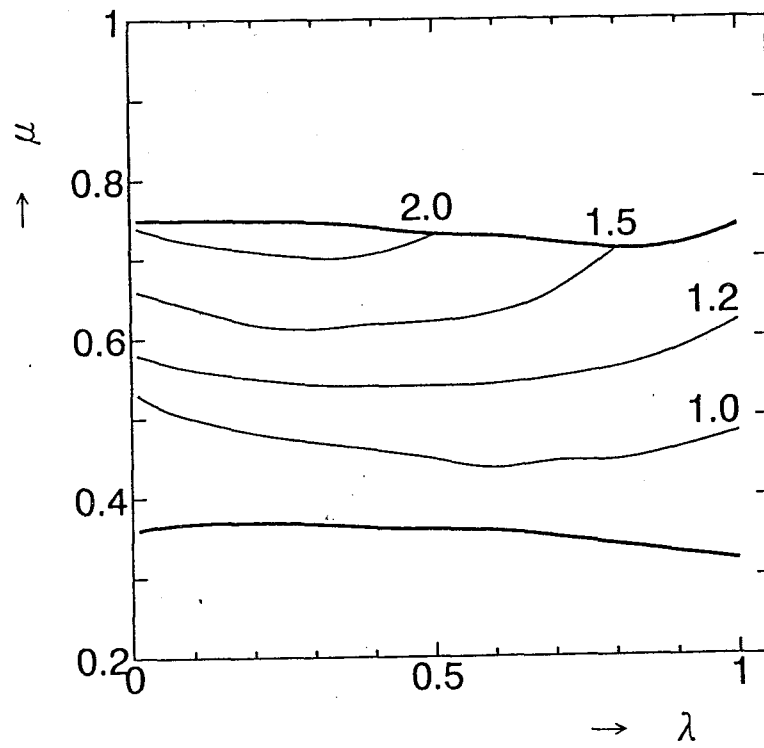


図 31 $I s m a x^* (\alpha = 0.6)$

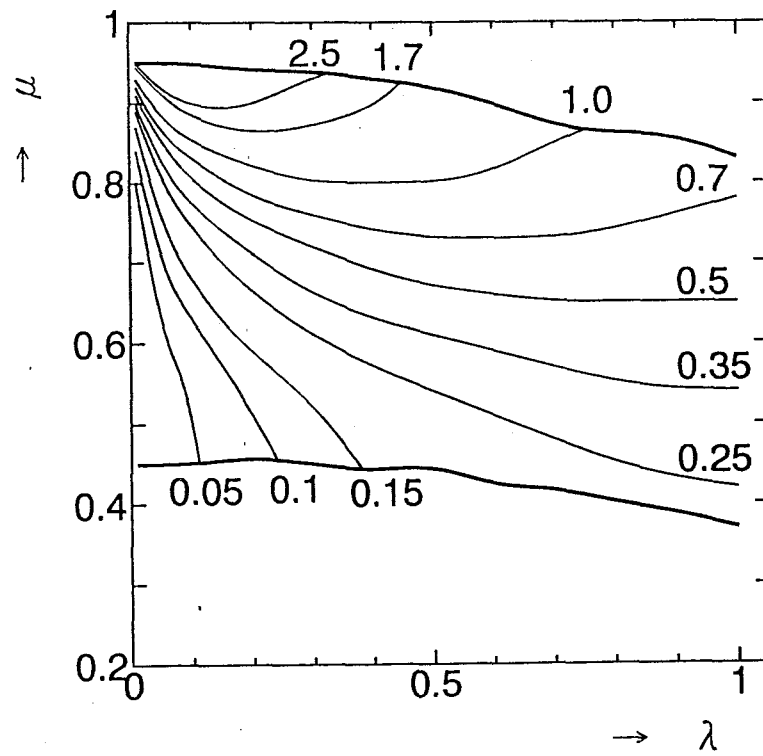


図 3.2 $P o^* (\alpha = 0.05)$

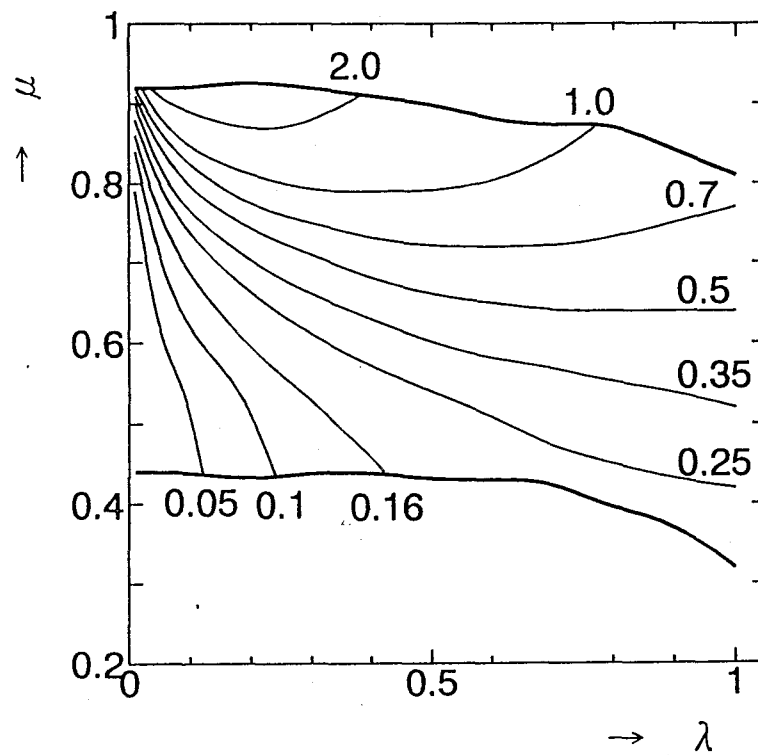


図 3.3 $P o^* (\alpha = 0.1)$

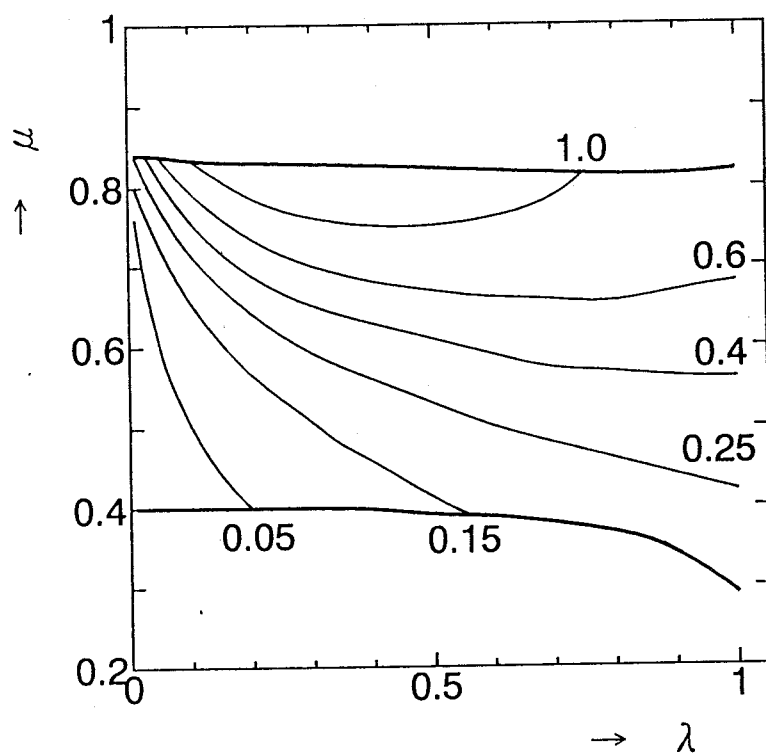


図 3.4 $Po^* (\alpha = 0.3)$

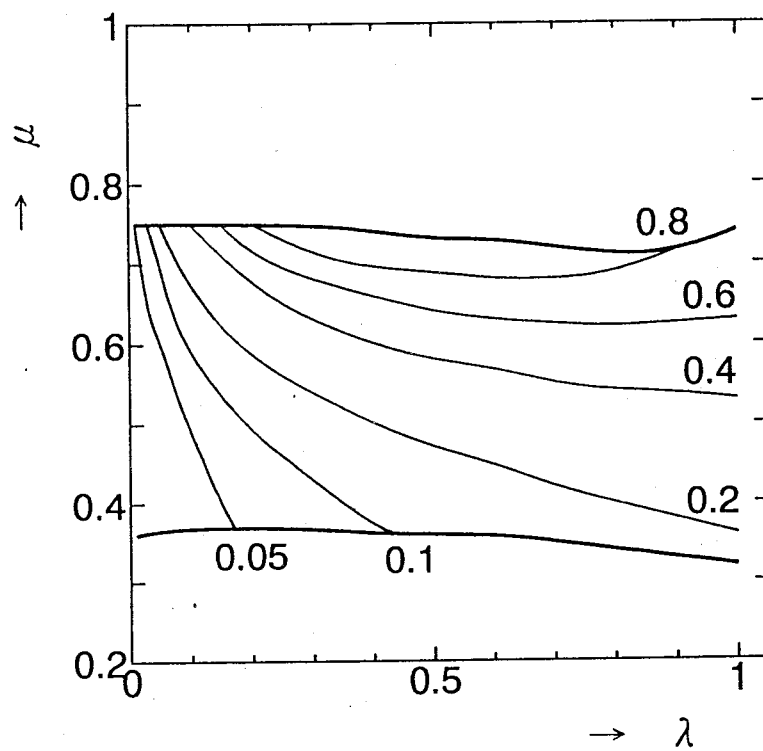
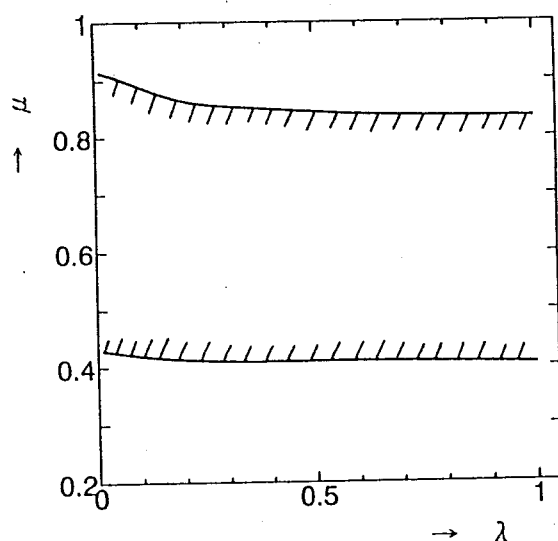


図 3.5 $Po^* (\alpha = 0.6)$

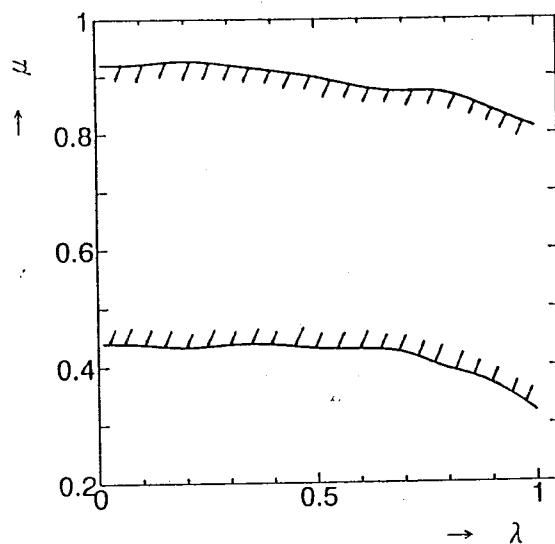
以上、各諸特性を動作波形と特性値分布より、総合的に評価・検討すると、回路設計においては、転流重複現象を利用した、比較的広いZCS動作領域を確保し、コイルの小型・軽量化、導通損失の減少も達成できる $\alpha = 0.1$ 程度、また、 P_o^* が比較的大きい割に V_{smax}^* が電源電圧の1.6倍程度、 I_{smax}^* も無次元化基準電流の5倍程度に抑制できる $\mu = 0.88$ 、 $\lambda = 0.2$ 付近が適当ではないかと考えられる。

5. 4 従来ZCS型との動作領域比較

今回提案しているDCL型と従来型のZCS動作領域を比較すると、従来型に比べ、DCL型の方が、 μ の上限が全体に広がっている。また λ が大きくなるに従い、 μ の下限も広がっている。すなわち、DCL型の方が従来のZCS型に比べて、ZCS動作領域における周波数（ μ 変化）の可変幅が拡大している。このことは、負荷変動等における周波数制御において、有利であると考えられる。



(a) 従来型フルブリッジZCS高周波インバータ

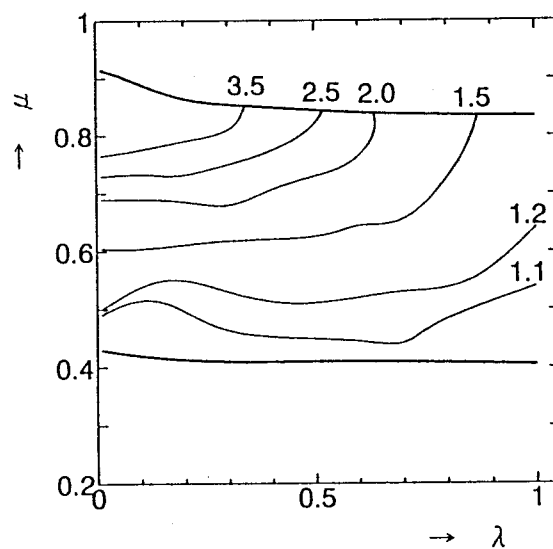


(b) DCL型フルブリッジZCS高周波インバータ

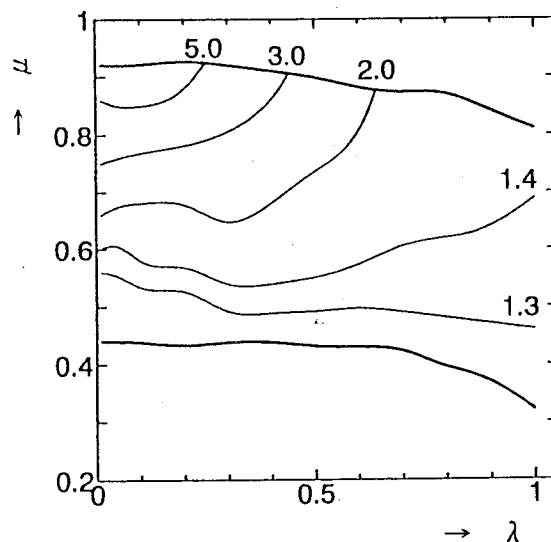
図36 ZCS動作領域比較 ($\alpha = 0.1$)

5. 5 従来ZCS型との諸特性値分布比較

従来型とDCL型のZCS動作領域内の各諸特性値分布を比べてみると、 I_{smax}^* 、 V_{smax}^* 、 P_o^* の各特性曲線の値は、 (μ, λ) の値によっては若干の差異が認められるが、ほぼ一致している。すなわち、両方式の違いによるスイッチング動作責務の影響は極めて小さいことが特性解析結果から判明した。しかし、このことは、リアクトル数の大幅減少による、装置の小型化において、DCL型は、ZCS特性の長所を失わずに小型、高効率化が可能であることを裏付けるものである。

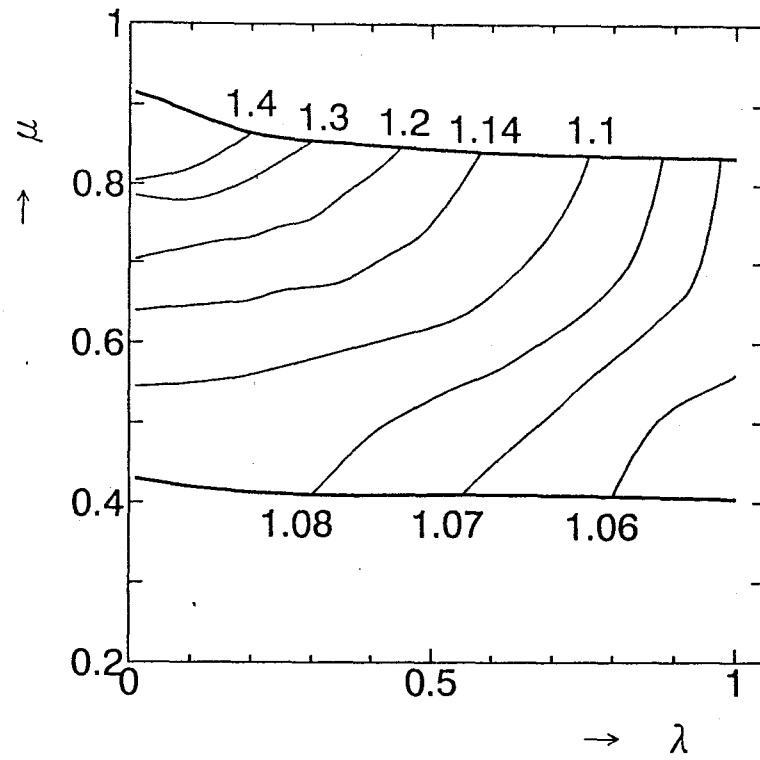


(a) 従来型フルブリッジZCS高周波インバータ

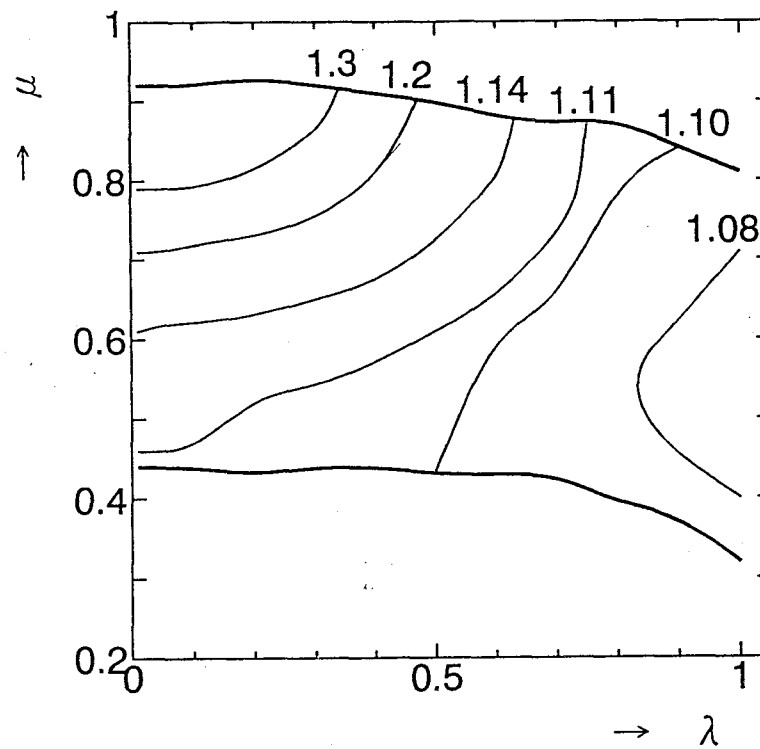


(b) DCL型フルブリッジZCS高周波インバータ

図37 I_{smax}^* 分布 ($\alpha = 0.1$)

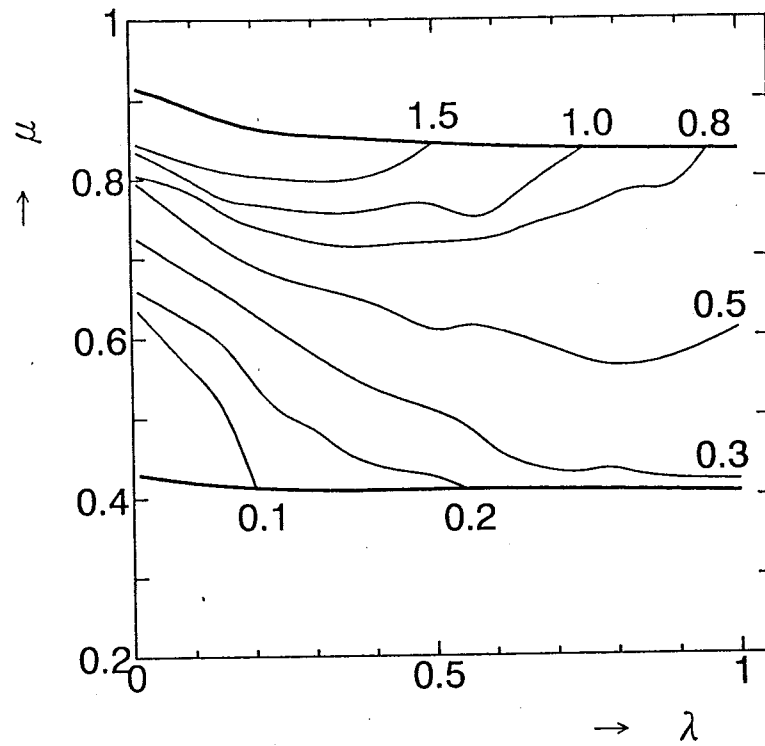


(a) 従来型フルブリッジZCS高周波インバータ

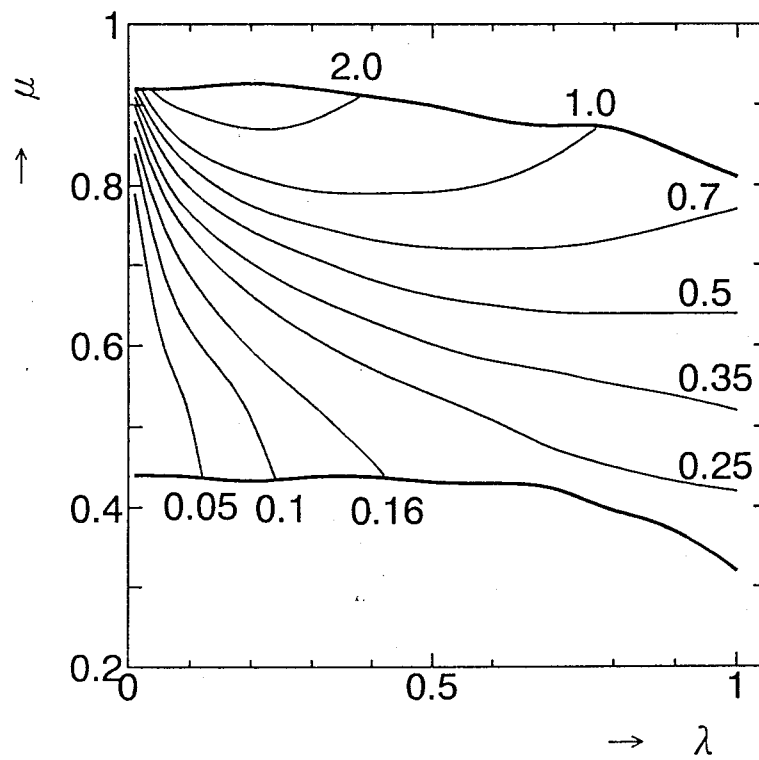


(b) DCL型フルブリッジZCS高周波インバータ

図38 $V s \max^*$ 分布 ($\alpha = 0.1$)



(a) 従来型フルブリッジZCS高周波インバータ



(b) DCL型フルブリッジZCS高周波インバータ

図39 Po^* 分布 ($\alpha = 0.1$)

第6章 回路試設計

数値解析に基づくZCS動作特性のシミュレーションを参考に、回路設計を行う。ここでは、前章までの解析結果に基づき、

$$\mu = 2\pi f_o \sqrt{LC} \quad \dots (13)$$

$$\lambda = R / \sqrt{L/C} \quad \dots (14)$$

の2式より、実際の回路コンポーネントとしてのインダクタンス： L_o 、コンデンサ容量： C_o 、負荷抵抗： R_o 、そして周波数： f_o を求める。ここで、 L_o は誘導加熱ユニットの実測値から、 $L_o = 150 [\mu H]$ であり、 R_o は実験時に得られる値であるが設計上、 $R_o = 4.3 [\Omega]$ として、 C_o と f_o を求める。今回、この回路試設計では、誘導加熱による実際の燃焼実験を目的として、出力電力： P_o が1[kW]程度になることを目標とする。

まず、前章において、 $\alpha = 0.1$ 、 $\mu = 0.88$ 、 $\lambda = 0.2$ と決定したので、これらを(14)式に代入して、

$$\begin{aligned} \lambda &= R_o / \sqrt{L_o / C_o} \\ 0.2 &= 4.3 / \sqrt{150 \times 10^{-6} / C_o} \\ C_o &= 0.324 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

となり、結果を(13)式に代入して

$$\begin{aligned} \mu &= 2\pi f_o \sqrt{L_o \cdot C_o} \\ 0.88 &= 2\pi f_o \sqrt{150 \times 10^{-6} \times 0.324 \times 10^{-6}} \\ f_o &= 20074.74 \end{aligned}$$

以上より、 $C_o = 0.32 [\mu F]$ 、 $f_o = 20 [kHz]$ の値を得る。

このとき出力電力： P_o は、

$$\begin{aligned} P_o^* &= P_o / P \\ P_o &= P_o^* \times P \\ &= P_o^* \times E \times I \\ &= P_o^* \times E_d \times E_d / \sqrt{L_o / C_o} \quad \dots (15) \end{aligned}$$

であり、 $\alpha = 0.1$ 、 $\mu = 0.88$ 、 $\lambda = 0.2$ の P_o^* の特性分布図（図30）より、 $P_o^* = 2.5$ 、起電力： E_d は、実際の回路駆動では50～200 [V]ぐらいまで可変させるが、設計上 $E_d = 100$ [V]として（15）式に代入すると、

$$\begin{aligned} P_o &= 2.5 \times 100^2 / \sqrt{150 \times 10^{-6} / 0.324 \times 10^{-6}} \\ &= 1162.79 \text{ [W]} \end{aligned}$$

となって、出力電力は目標の1 [kW]を達成できる。実験では、起電力を変化させることにより、出力電力を調整することが可能である。

次に、スイッチ電圧最大値： V_{smax} とスイッチ電流最大値： I_{smax} の値を検討する。無次元化パラメータの式より、

$$\begin{aligned} V_{smax}^* &= V_{smax} / E_d \\ \therefore V_{smax} &= V_{smax}^* \times E_d \quad \dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{smax}^* &= I_{smax} / I \\ \therefore I_{smax} &= I_{smax}^* \times I \\ &= I_{smax}^* \times E_d / \sqrt{L_o / C_o} \quad \dots (17) \end{aligned}$$

となるので、 $E_d = 100$ [V]として、また $\alpha = 0.1$ 、 $\mu = 0.88$ 、 $\lambda = 0.2$ のときの V_{smax}^* 、 I_{smax}^* の特性分布図（図28、図29）より、 $V_{smax}^* = 1.6$ 、 $I_{smax}^* = 5.07$ を（16）式、（17）式に代入して、

$$\begin{aligned} V_{smax} &= 1.6 \times 100 \\ &= 161 \text{ [V]} \end{aligned}$$

$$I_{smax} = 5.07 \times 100 / \sqrt{150 \times 10^{-6} / 0.324 \times 10^{-6}}$$

$$= 23.6 \text{ [A]}$$

であるので、今回はスイッチング素子として、連続最大定格（600V／50A）のIGBT（2MB150N-060：富士電気）を選定する。このデバイスであれば、ディレーティングを考慮して最大定格の60％としても、

$$600 \times 0.6 = 360 \text{ [V]}$$

$$50 \times 0.6 = 30 \text{ [A]}$$

であり連続使用にも耐えられる。よって選定したパラメータ、 $\alpha = 0.1$ 、 $\mu = 0.2$ 、 $\lambda = 0.88$ は適当であると言える。

以上、回路試設計より回路パラメータを表3の様に決定した。

表3 高周波誘導加熱用電源回路設計パラメータ

$L_o = 150 \text{ } [\mu\text{H}]$	$E_d = 100 \text{ [V]}$
$C_o = 0.32 \text{ } [\mu\text{F}]$	$\mu = 0.88$
$f_o = 20 \text{ [kHz]}$	$\lambda = 0.2$

第7章 排出微粒子低減用高周波誘導加熱装置の設計と実験

7.1 排出微粒子低減用高周波誘導加熱装置

実際にディーゼル排ガスに含まれる微粒子を加熱する事を想定して、排出微粒子低減用誘導加熱装置を製作した。図40にその外観を示す。この装置は直径10cm程のセラミックスの円筒の中に、層状に組んだ磁性ステンレス鋼をつめ、外側にワーキングコイルとしての高周波リッツ線を巻いたものである。

セラミックス筒内のステンレス鋼は、排ガス中に含まれる微粒子を燃焼させるためには約550℃以上に加熱する必要がある事が確認されている。その場合、セラミックス筒に巻いた高周波リッツ線自体が焼けてしまう恐れがあるので、セラミックスの筒にグラス・ウールの断熱材を巻き、その上からリッツ線を巻いた。リッツ線を巻く間隔は絶縁を考慮し、線間に1巻の余裕がある程度とした。

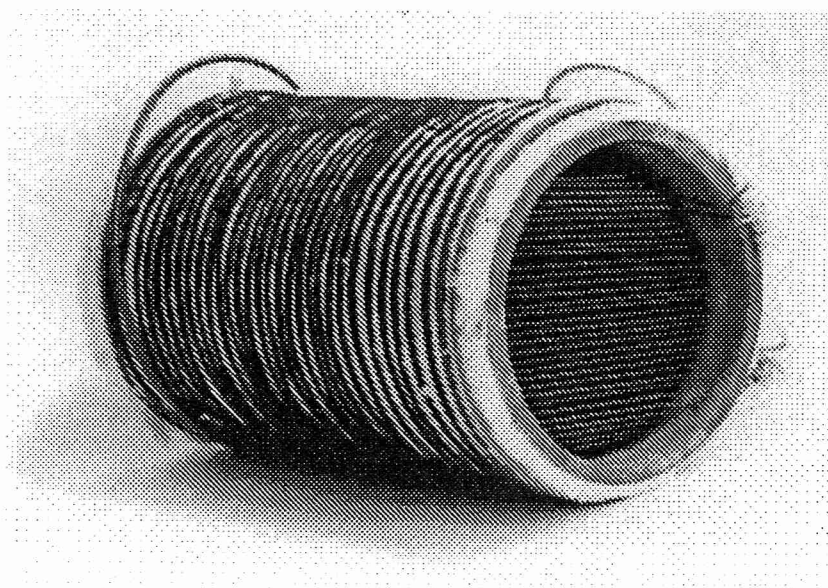


図40 排出微粒子低減用誘導加熱装置

7. 2 実験

実験は、高周波リッツ線に約1[kW]の高周波交流を通電させ、ステンレス鋼を加熱し、そこにすす（排出微粒子）を吹き付けて、燃焼させる方法で行った。

実験では、図4-1に示すように装置を水平に吊し、ステンレス鋼のフィルタを700℃近くまで加熱した状態で、横からすすを吹き付ける形で、燃焼実験を実施した。図4-2に、金属フィルタにおける燃焼前後の写真を時間の経過順に示す。

まず、図4-2-(a)は、金属フィルタが700℃近くまで高温に加熱し、赤くなった状態である。次に、図4-2-(b)は、(a)の状態の時に横からすすを吹き付け、すすが金属フィルタに接触し、瞬間的に燃焼している写真である。最後に、図4-2-(c)は、大きなすす粒子の燃焼等の後燃え状態を表している。この図(a)～(c)より、高温加熱された金属フィルタに接触した瞬間、すすが勢いよく燃焼している様子がわかる。また、図(b)～(c)の時間的間隔は、およそ0.5秒である。

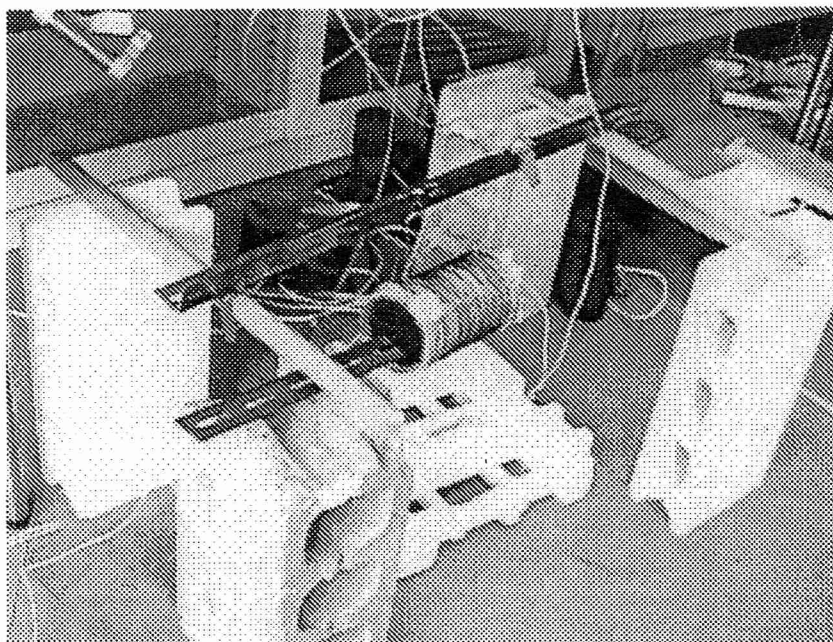


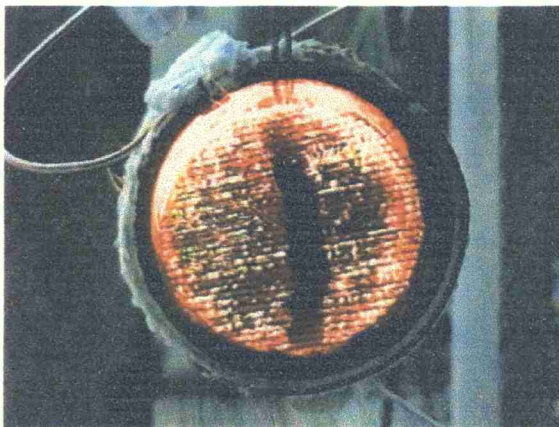
図4-1 実験装置の外見



(a)



(b)



(c)

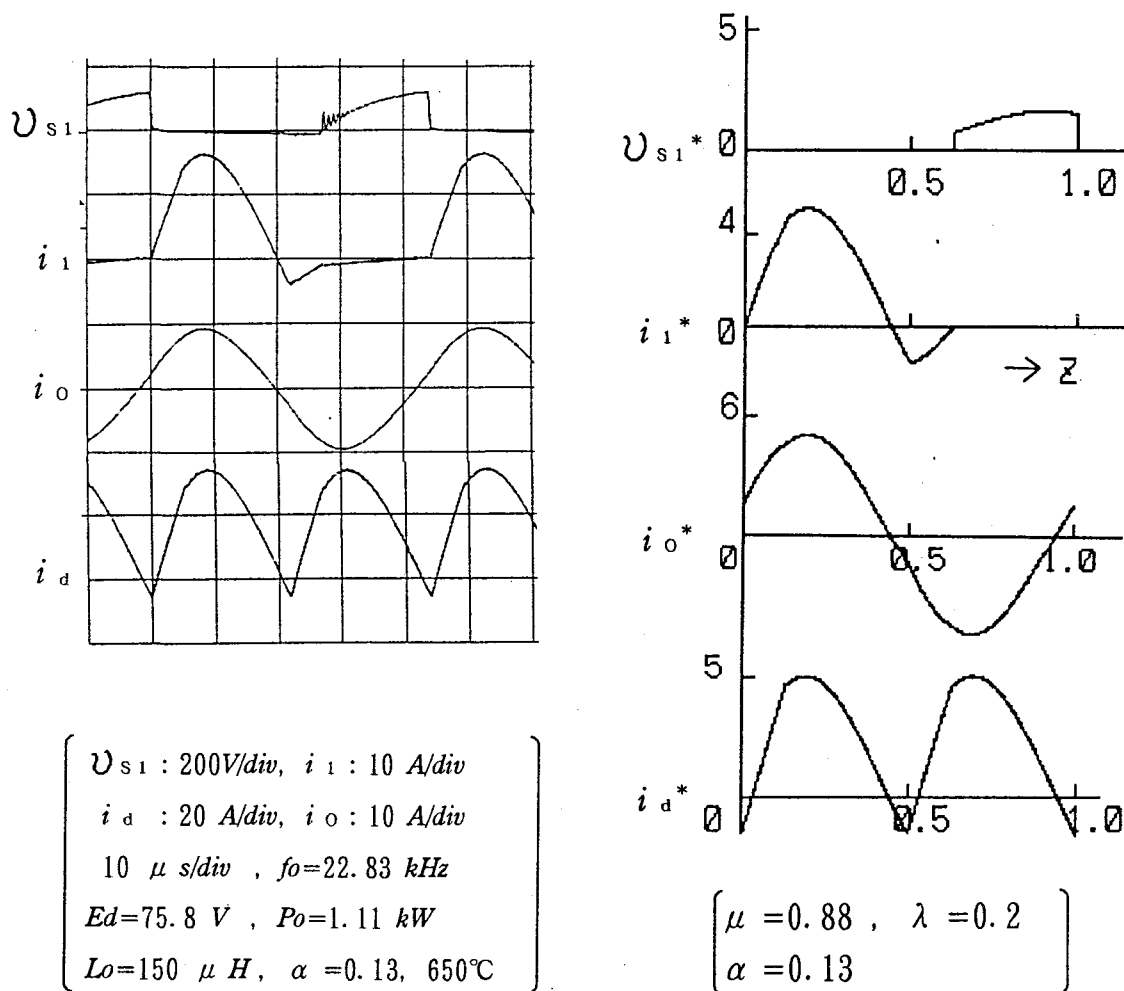
図4 2 燃焼の様子

7. 3 動作波形

図43は、PM燃焼実験における、 $\alpha = 0.1$ の時の数値解析波形と実験値波形とを比較して示したものである。ただし、実験値では、配線における漂遊インダクタンス成分を含んでいたため、 $\alpha = 0.13$ となり、数値解析においても $\alpha = 0.13$ で計算した。

加熱実験時には、ステンレス鋼を 550°C 以上に加熱するために、約 1 [kW] の電力で30分程度の時間がかかったが、ZCSの効果によりスパイク電圧を発生することなく、安定な運転を行うことができた。

実験値波形をみると、主スイッチに流れる電流に比べ、ダイオードに流れる電流は、時間的にも大変少ないため、効率も良く、理想的な波形であると思われる。また、この2つの波形を比べると、理論値と実験値はよく一致しており、理論の正当性を裏付けている。

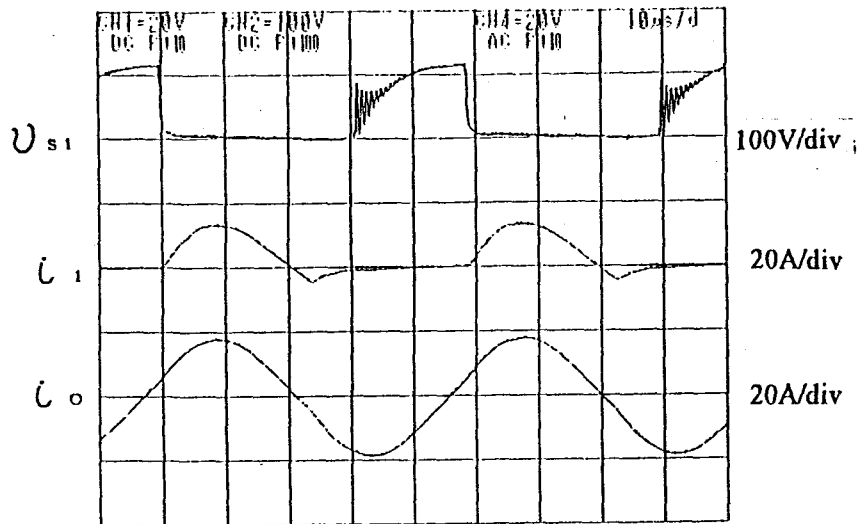


(a) 実験波形

(b) 理論波形

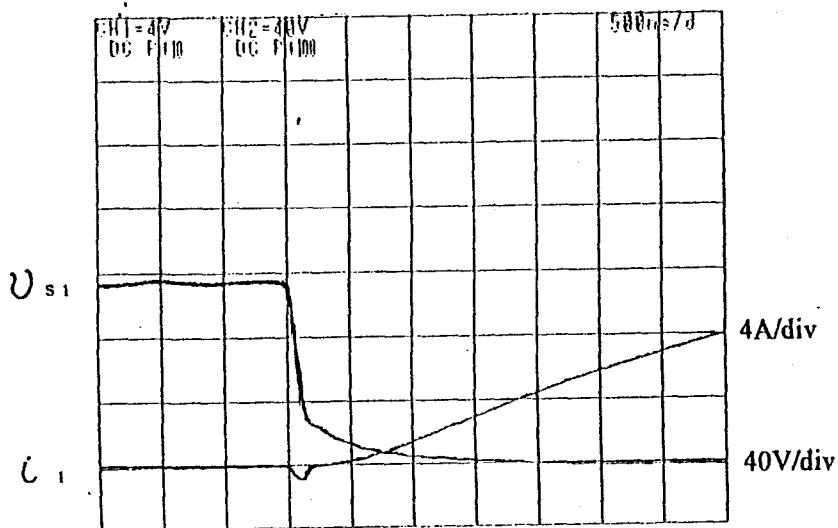
図43 動作波形

さらに、それぞれのパラメータを変更し、動作させたときの各部、動作波形を以下、図44-1～52に示す。

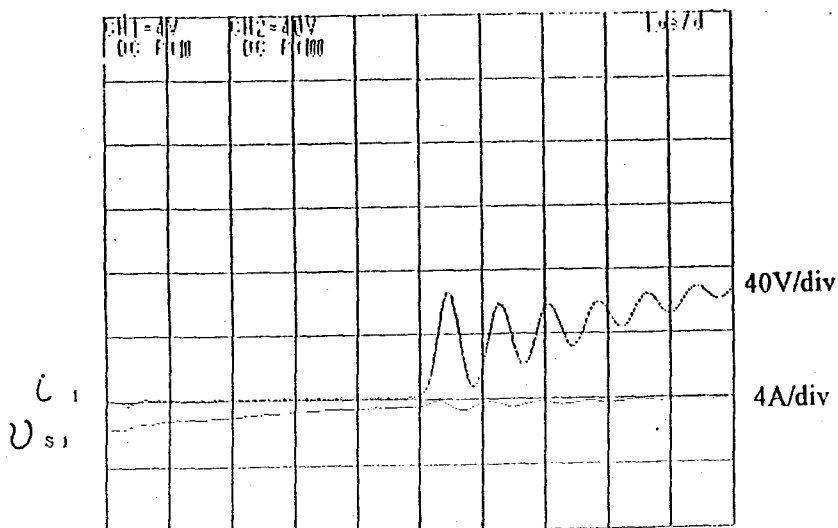


$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.92$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 154.1 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.57 kHz$

$I_d = 11.5 A$
 $E_d = 70.2 V$
 $P_o = 904 w$
 $I_o = 15.19 A$
 $V_o = 282.2 V$

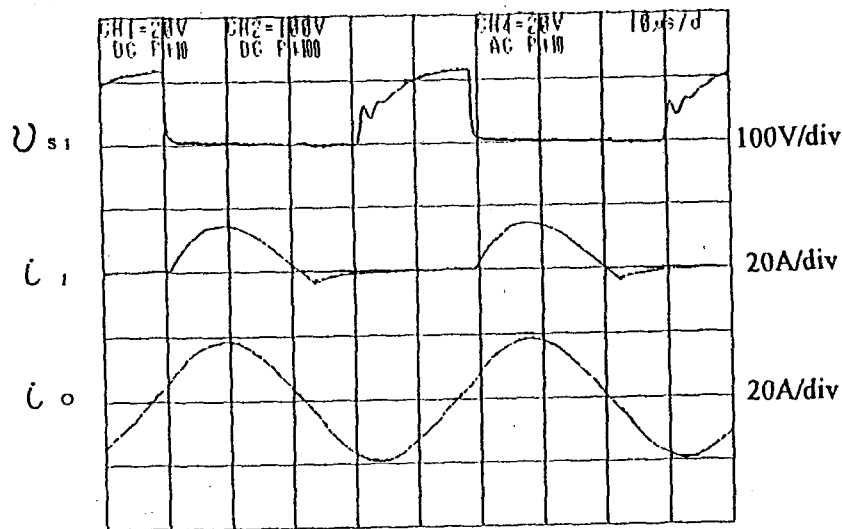


ターンオン波形



ターンオフ波形

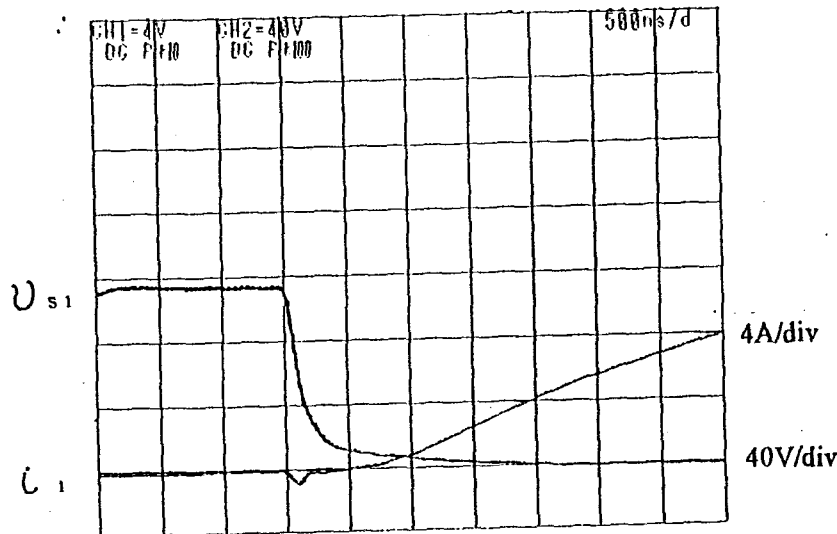
図 4 4-1 動作波形



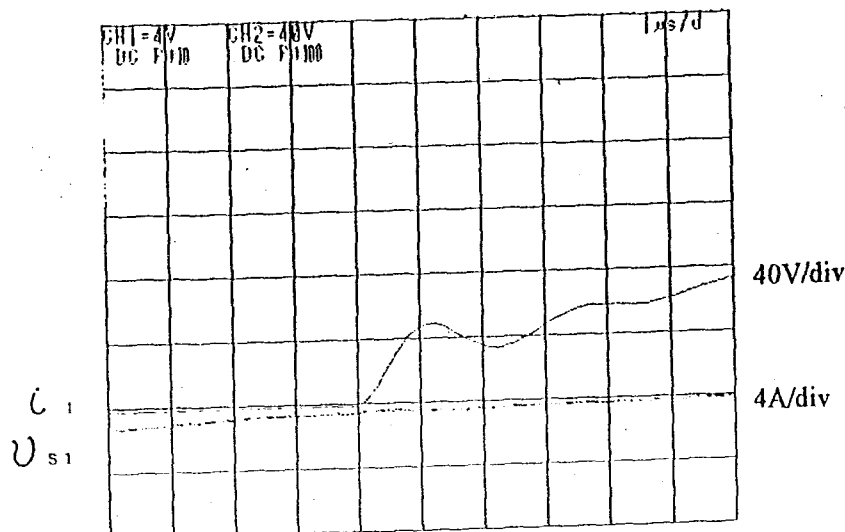
$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.92$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 154.1 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.57 kHz$

$I_d = 12.1 A$
 $E_d = 69.1 V$
 $P_o = 907 w$
 $I_o = 15.25 A$
 $V_o = 286.6 V$

* スナバ回路
($R_s = 20 \Omega$ $C_s = 8 nF$)

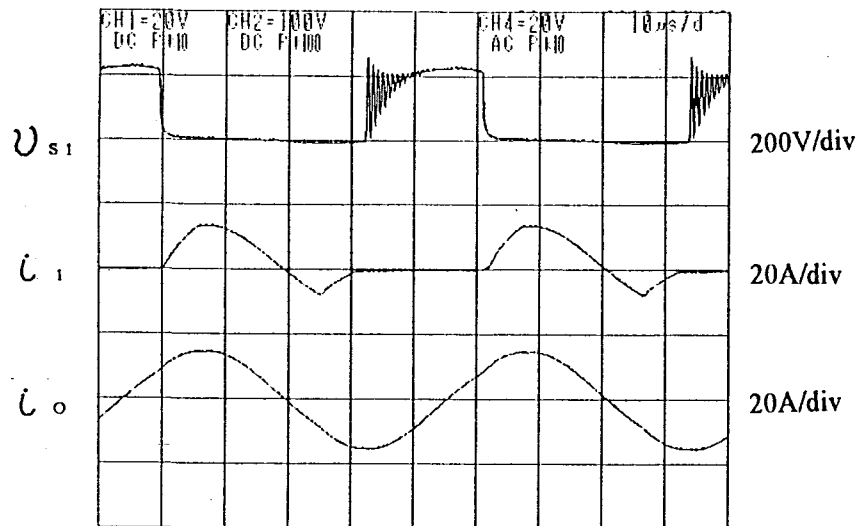


ターンオン波形



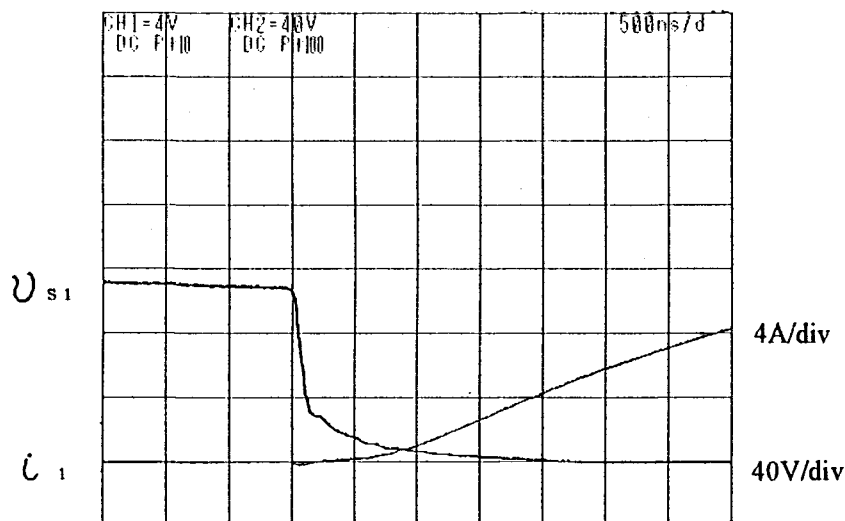
ターンオフ波形

図 4 4-2 動作波形

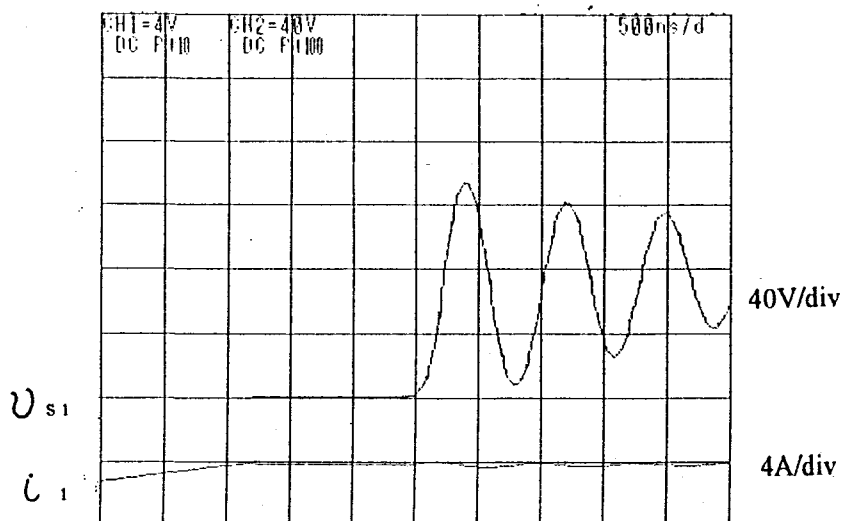


$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.86$
 $\lambda = 0.12$
 $L_o = 150 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 19.45 kHz$

$I_d = 7.0 A$
 $E_d = 77.9 V$
 $P_o = 600 w$
 $I_o = 12.90 A$
 $V_o = 232.5 V$

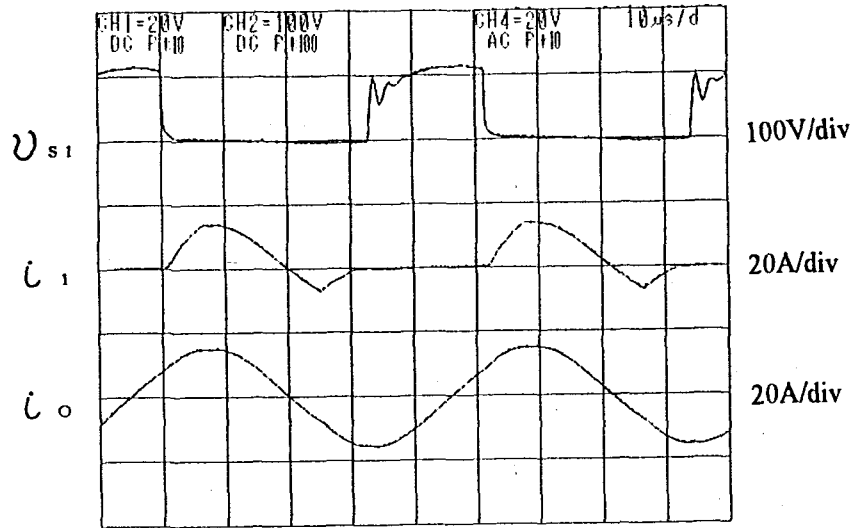


ターンオン波形



ターンオフ波形

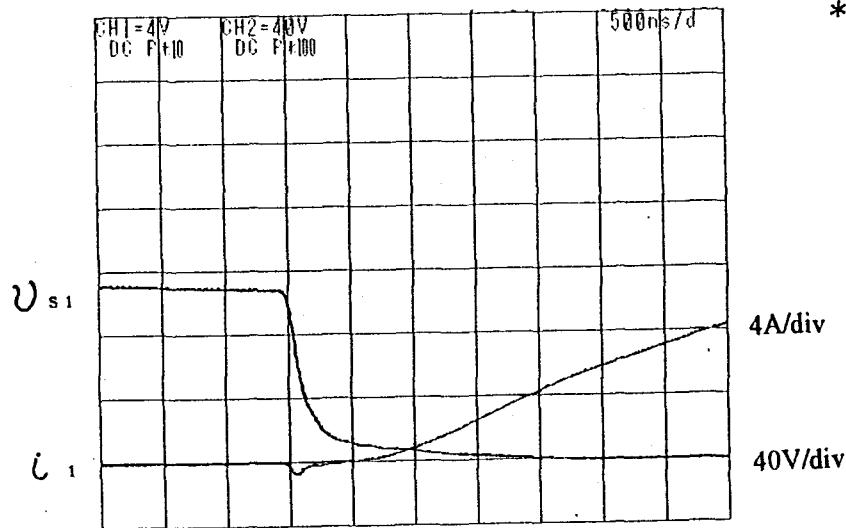
図 4 4 - 3 動作波形



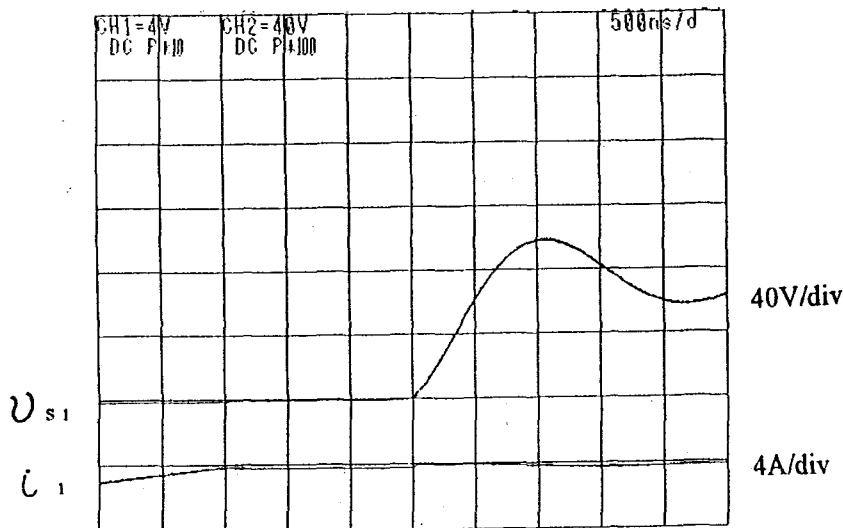
$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.86$
 $\lambda = 0.12$
 $L_o = 150 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 19.45 kHz$

$I_d = 7.3 A$
 $E_d = 77.2 V$
 $P_o = 600 w$
 $I_o = 12.88 A$
 $V_o = 232.5 V$

* スナバ回路
 ($R_s = 20 \Omega$ $C_s = 8 nF$)

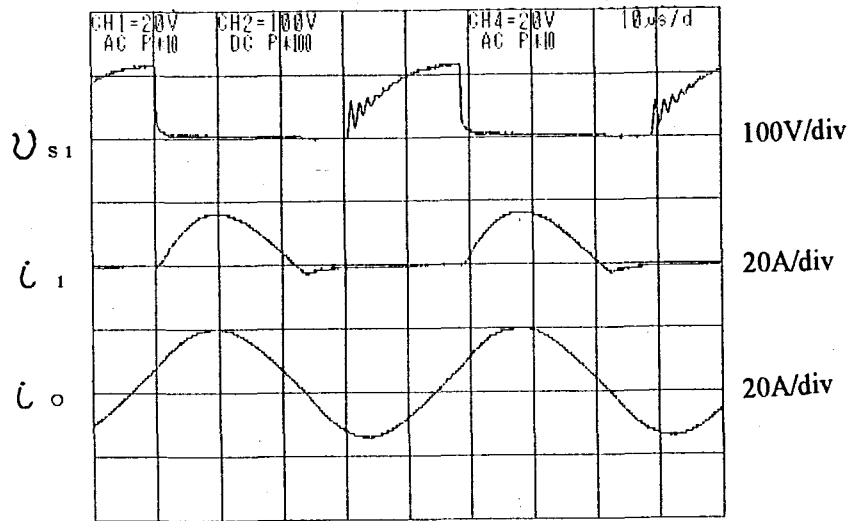


ターンオン波形



ターンオフ波形

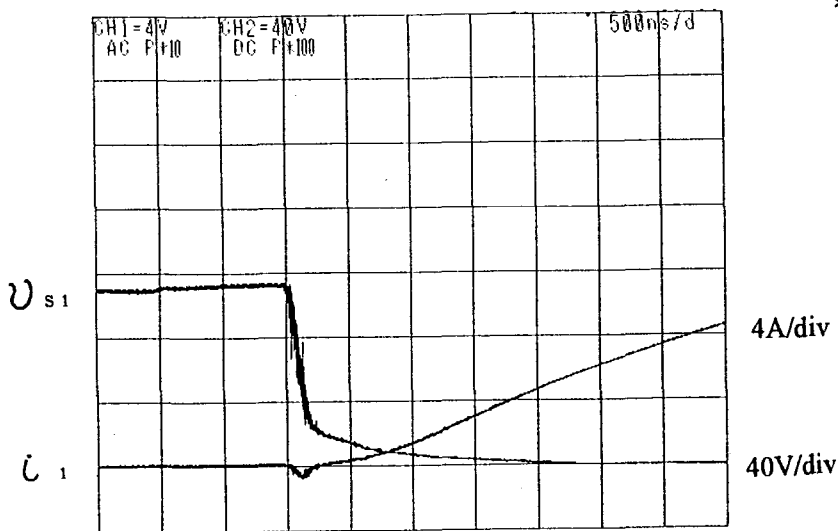
図 4 4 - 4 動作波形



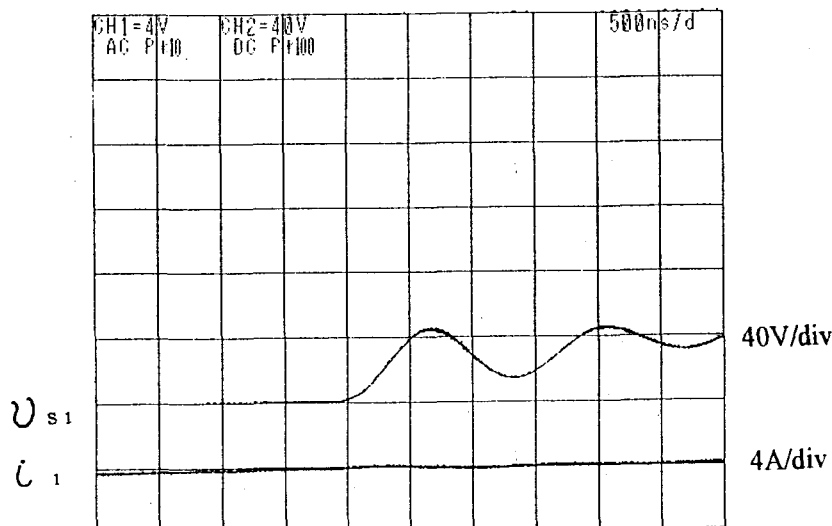
$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.92$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 154.1 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.57 kHz$
 $t = 265^\circ C$

$I_d = 12.4 A$
 $E_d = 65.9 V$
 $P_o = 901 w$
 $I_o = 15.26 A$
 $V_o = 289.6 V$

* スナバ回路
 ($R_s = 20 \Omega$ $C_s = 2 nF$)

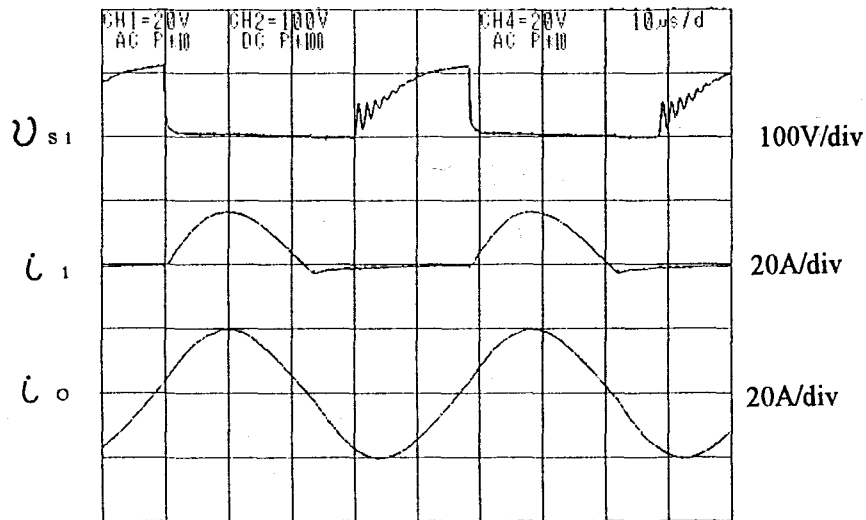


ターンオン波形



ターンオフ波形

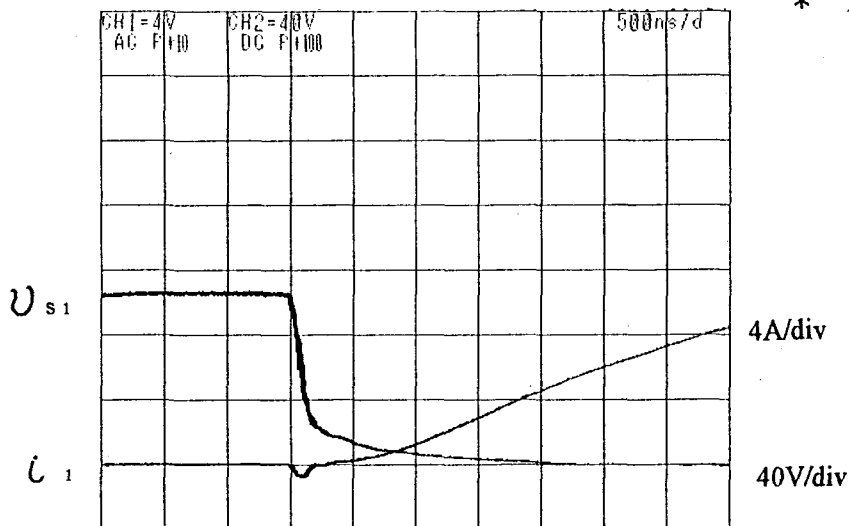
図 4 4 - 5 動作波形



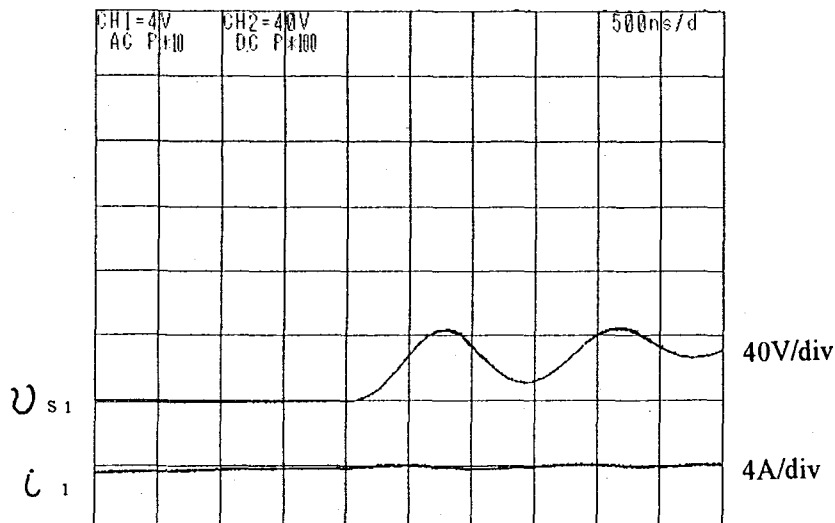
$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.92$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 154.1 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.57 kHz$

$I_d = 13.0 A$
 $E_d = 64.5 V$
 $P_o = 918 w$
 $I_o = 15.45 A$
 $V_o = 296.2 V$

* スナバ回路 (並列ダイオード接続)
($R_s = 20 \Omega$ $C_s = 2 nF$)

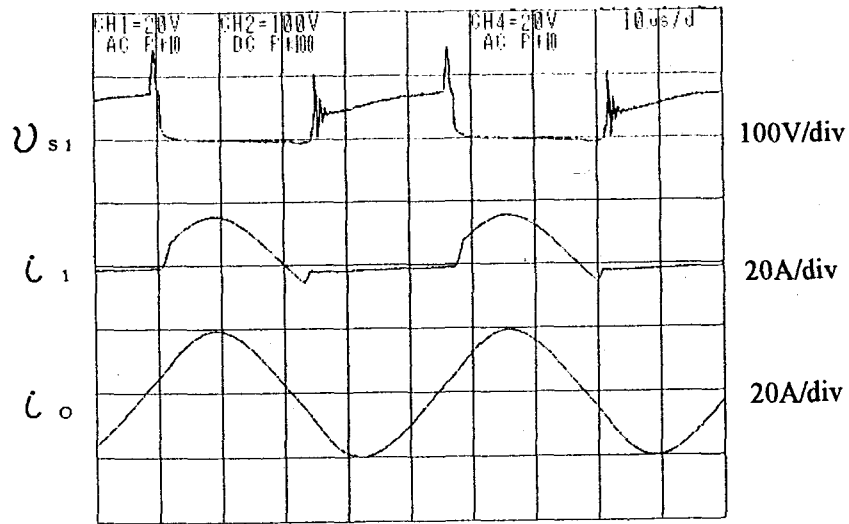


ターンオン波形



ターンオフ波形

図 4 4 - 6 動作波形

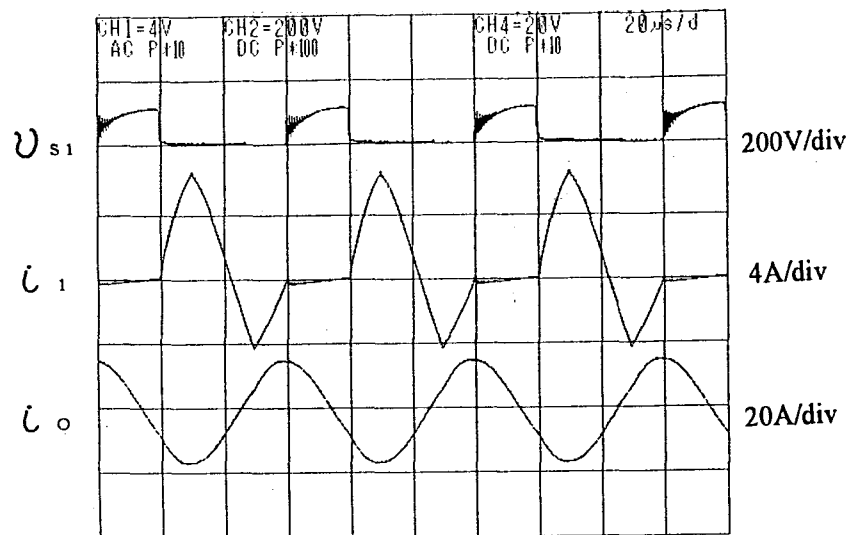


$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.92$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 154.1 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.57 kHz$

$I_a = 12.8 A$
 $E_a = 65.9 V$
 $P_o = 960 w$
 $I_o = 14.87 A$
 $V_o = 289.6 V$

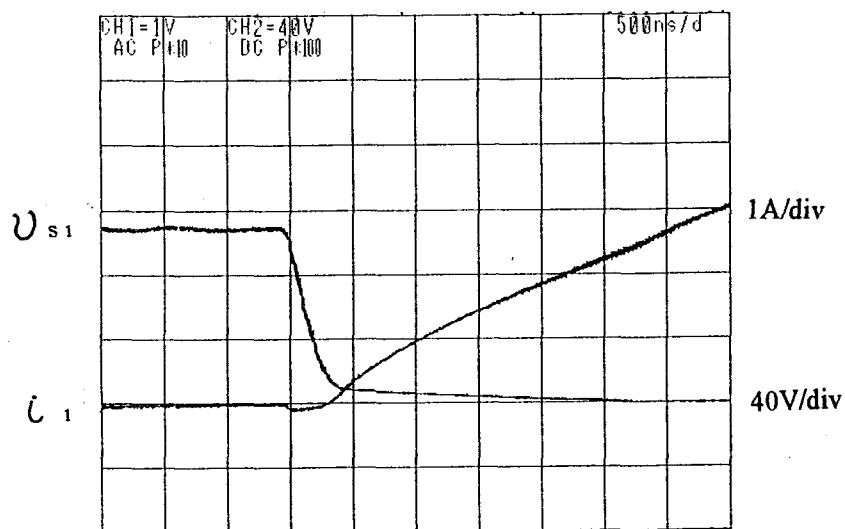
* スナバ回路 (並列ダイオード接続)
 ($R_s = 20 \Omega$ $C_s = 2 nF$)

図 4 4 - 7 動作波形



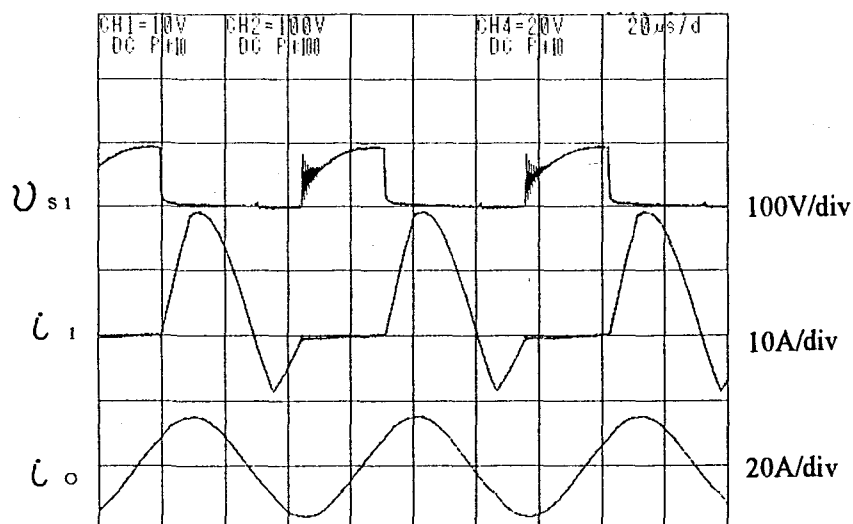
$\alpha = 0.17$
 $\mu = 0.86$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 144.6 \mu H$
 $C_o = 0.495 \mu F$
 $f_o = 16.66 kHz$
 $t = 291^\circ C$

$I_d = 15.31 A$
 $E_d = 71.6 V$
 $P_o = 853 w$
 $I_o = 16.88 A$
 $V_o = 254.7 V$



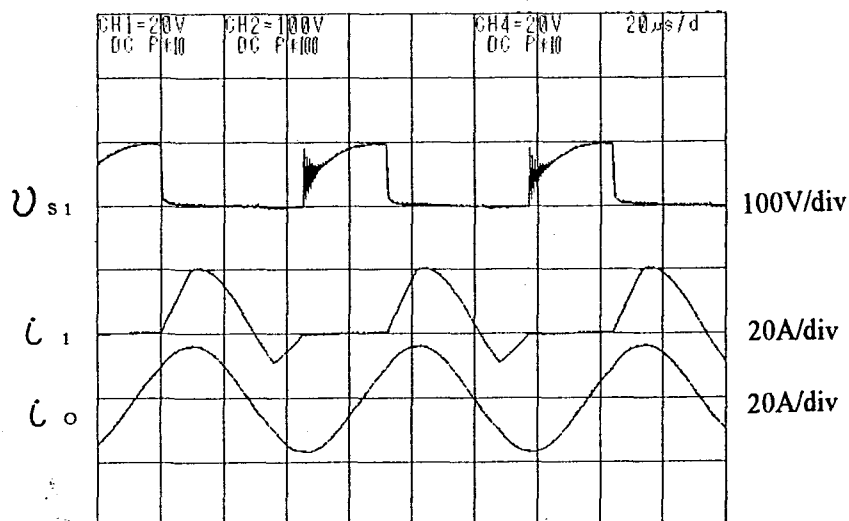
ターンオン波形

図 4 4 - 8 動作波形



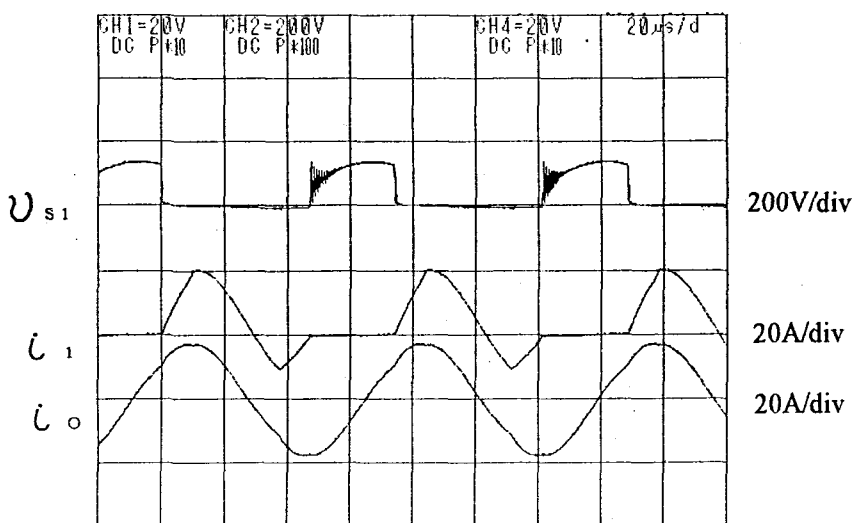
$\alpha = 0.8$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.15$
 $L_o = 144.6 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.88 kHz$

$P_{in} = 656.8 w$
 $I_d = 15.88 A$
 $E_d = 60.06 V$
 $P_o = 715 w$
 $I_o = 17.8 A$
 $V_o = 237.0 V$



$\alpha = 0.8$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.15$
 $L_o = 144.6 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.88 kHz$

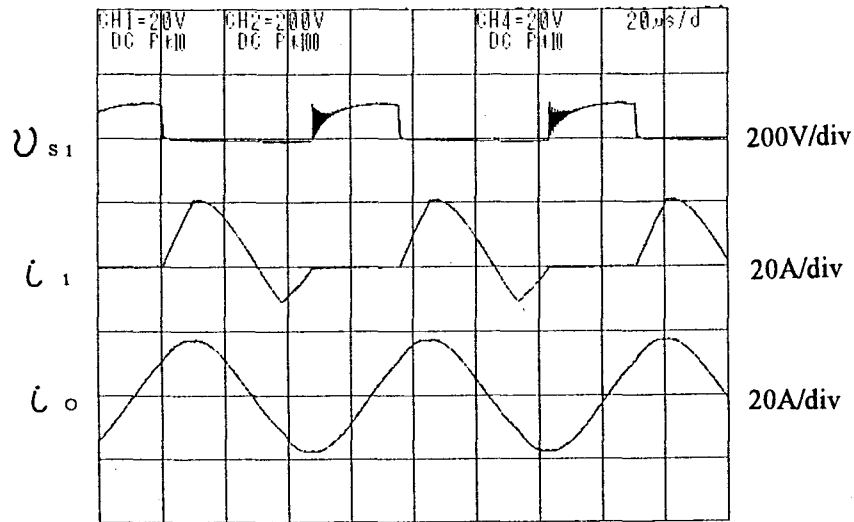
$P_{in} = 704 w$
 $I_d = 16.38 A$
 $E_d = 64.46 V$
 $P_o = 768 w$
 $I_o = 17.86 A$
 $V_o = 247.2 V$



$\alpha = 0.12$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.15$
 $L_o = 144.6 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.44 kHz$
 $t = 34.2^\circ C$

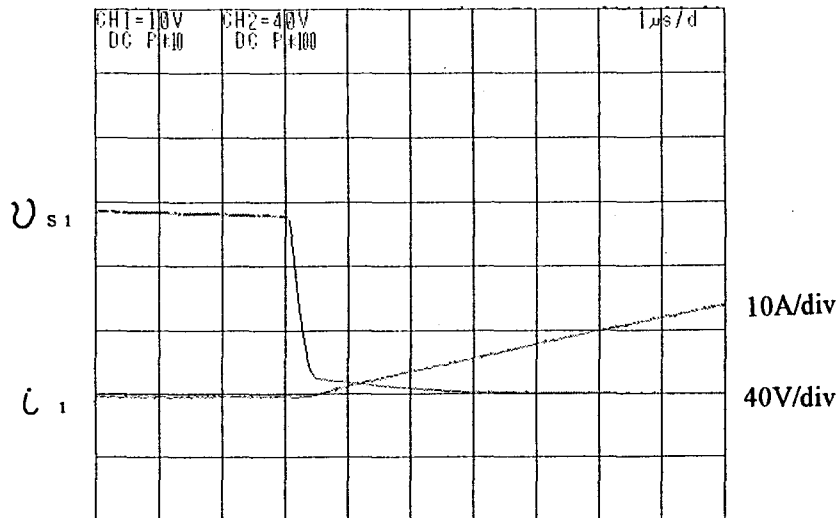
$P_{in} = 906.4 w$
 $I_d = 15.6 A$
 $E_d = 94.27 V$
 $P_o = 948 w$
 $I_o = 17.67 A$
 $V_o = 221.0 V$

圖 4 4 - 9 動作波形

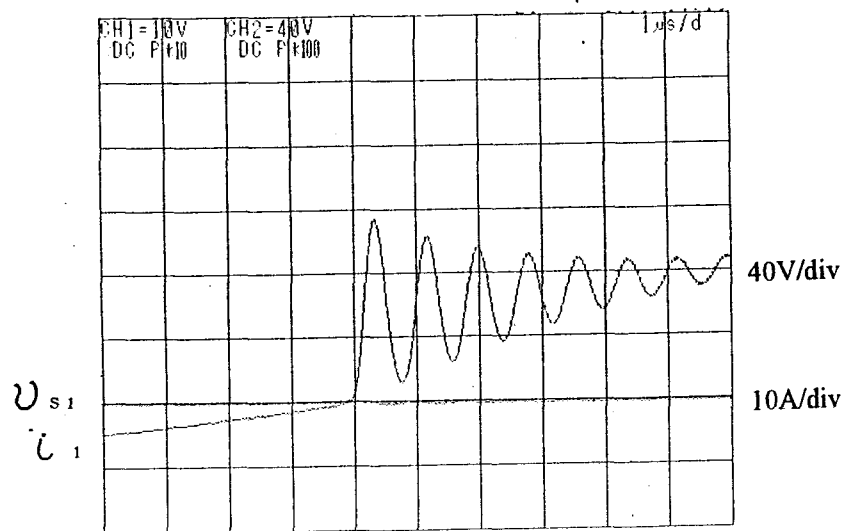


$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.83$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 148.4 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.3 kHz$

$P_{in} = 802.5 w$
 $I_d = 16.18 A$
 $E_d = 78.13 V$
 $P_o = 857 w$
 $I_o = 18.08 A$
 $V_o = 248.3 V$

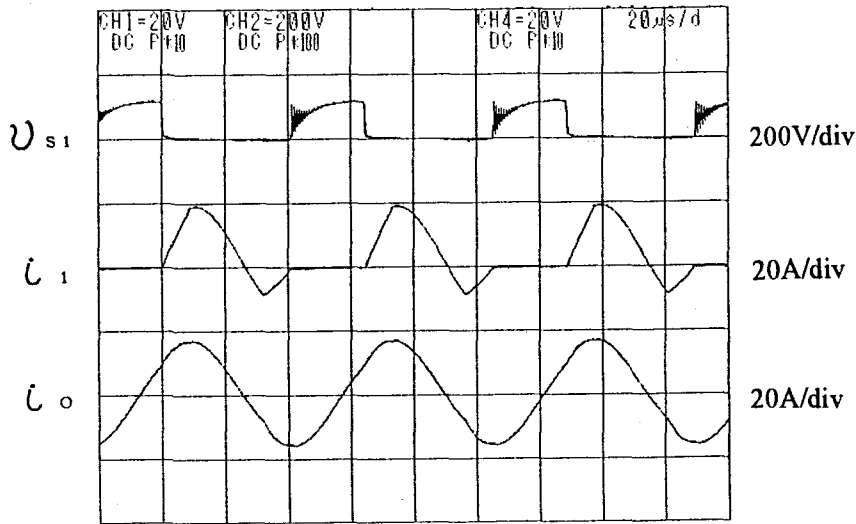


ターンオン波形



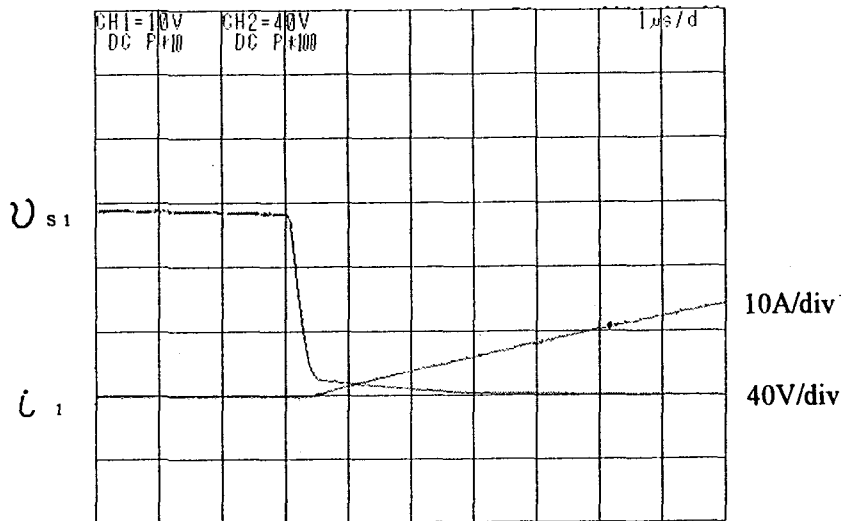
ターンオフ波形

図 4 4 - 1 0 動作波形

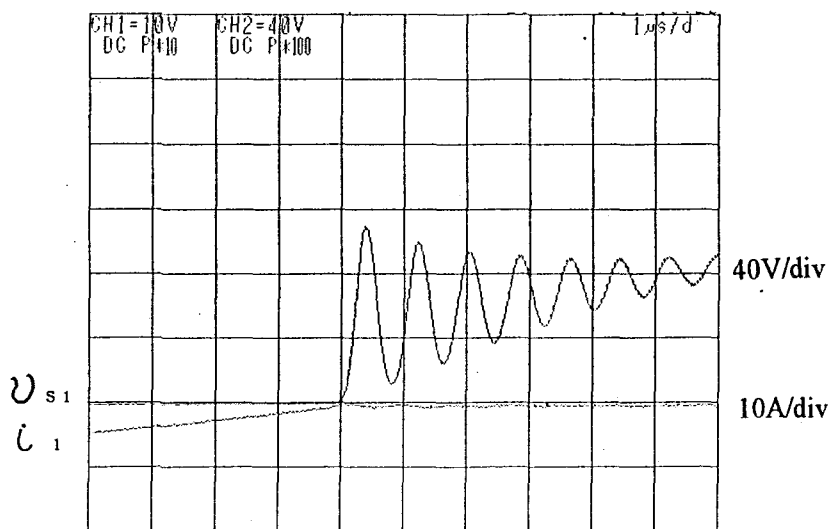


$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 148.4 \mu H$
 $C_o = 0.495 \mu F$
 $f_o = 15.8 kHz$

$P_{in} = 804.3 w$
 $I_d = 15.21 A$
 $E_d = 77.81 V$
 $P_o = 894 w$
 $I_o = 16.81 A$
 $V_o = 269.0 V$

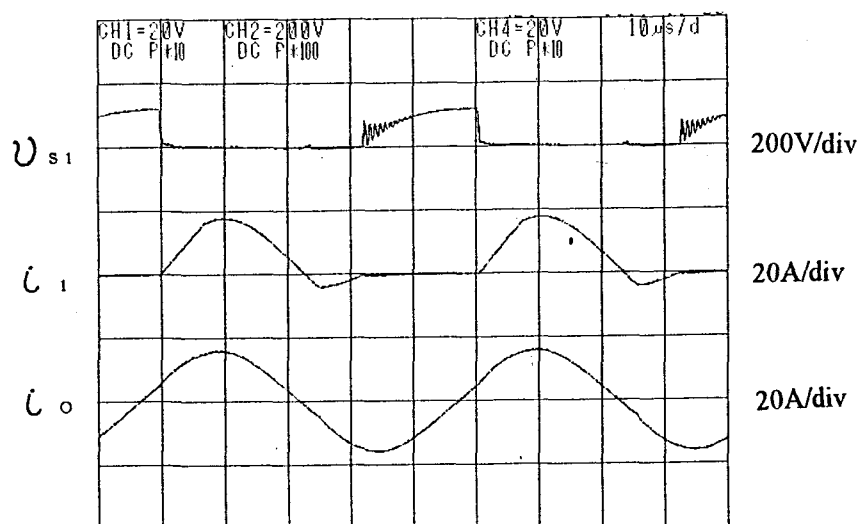


ターンオン波形



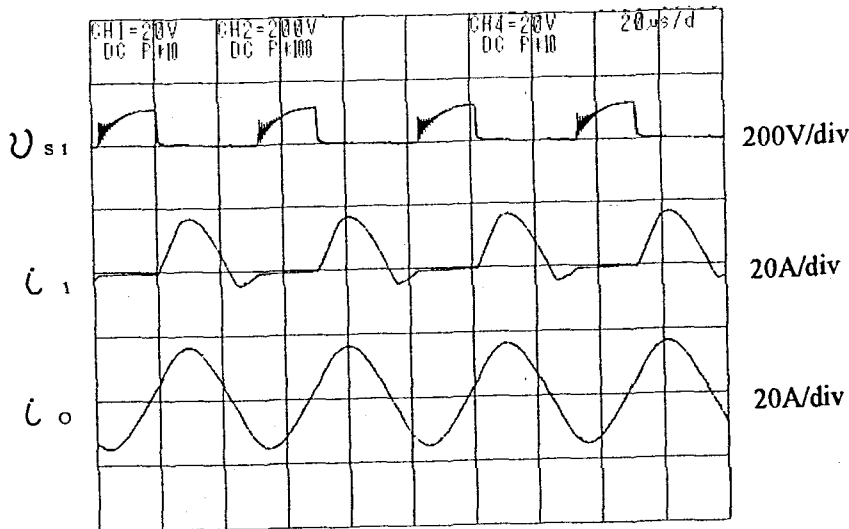
ターンオフ波形

図 4 4 - 1 1 動作波形

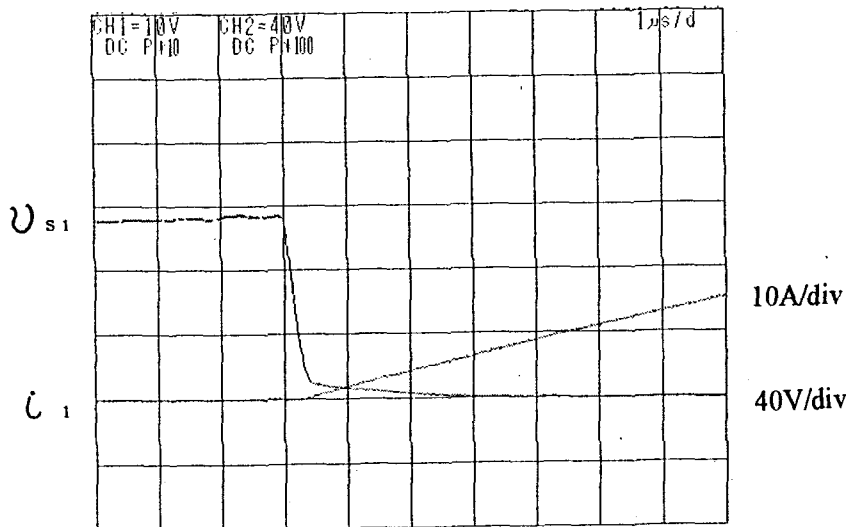


$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.88$
 $\lambda = 0.20$
 $L_o = 148.4 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.0 kHz$
 $P_{in} = 884 w$
 $I_d = 15.16 A$
 $E_d = 72.78 V$
 $P_o = 1039 w$
 $I_o = 15.78 A$
 $V_o = 317.1 V$

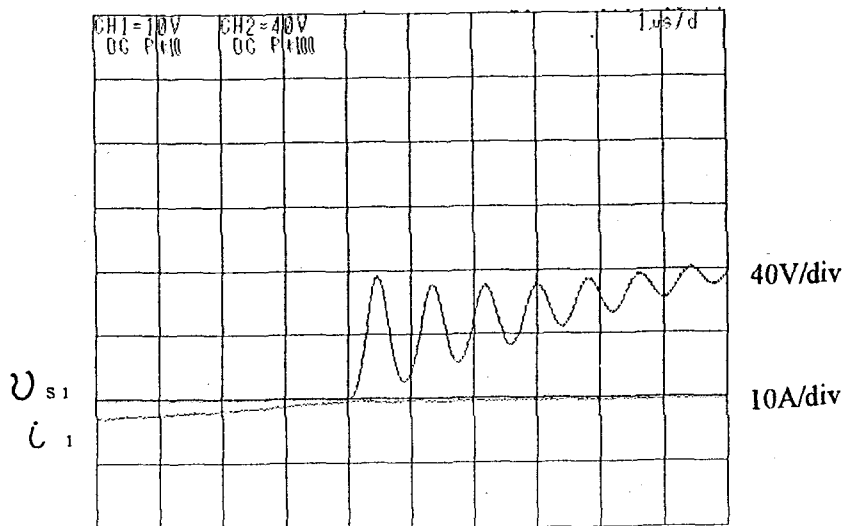
図 4 4 - 1 2 動作波形



$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.88$
 $\lambda = 0.20$
 $L_o = 148.4 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.0 kHz$
 $P_{in} = 805.8 w$
 $I_d = 14.27 A$
 $E_d = 71.49 V$
 $P_o = 947 w$
 $I_o = 14.97 A$
 $V_o = 298.3 V$

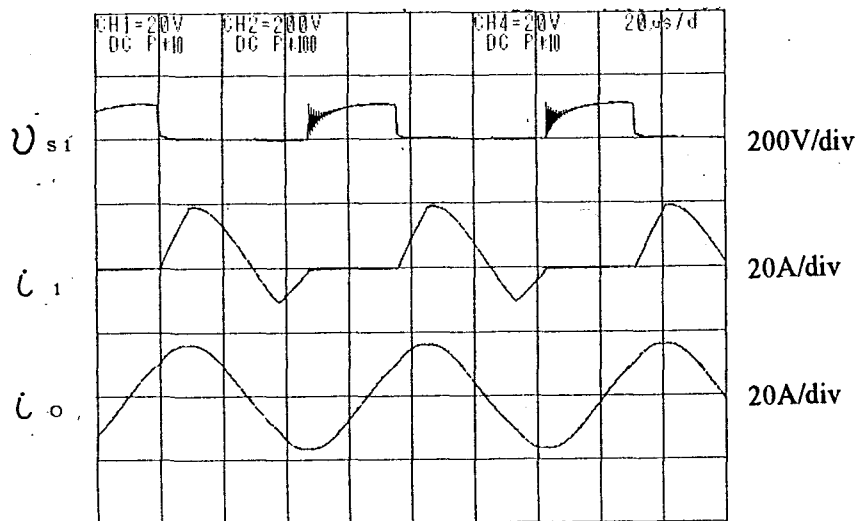


ターンオン波形



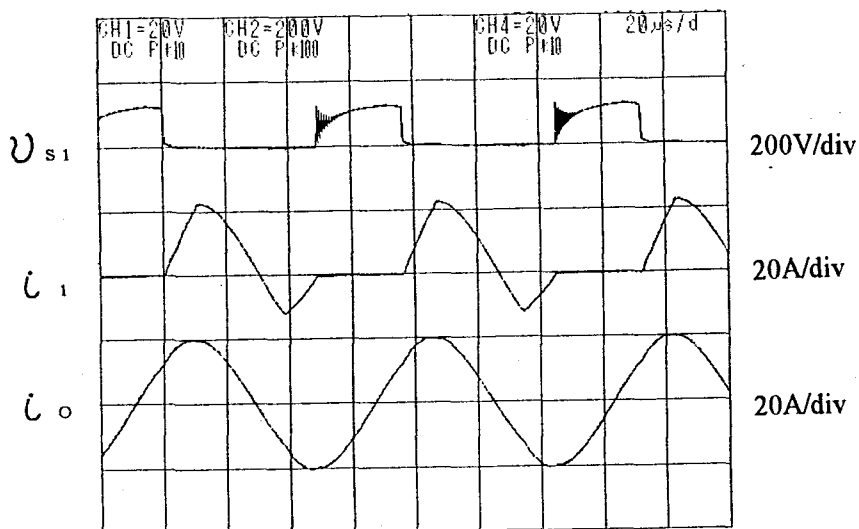
ターンオフ波形

図 4 4 - 1 3 動作波形



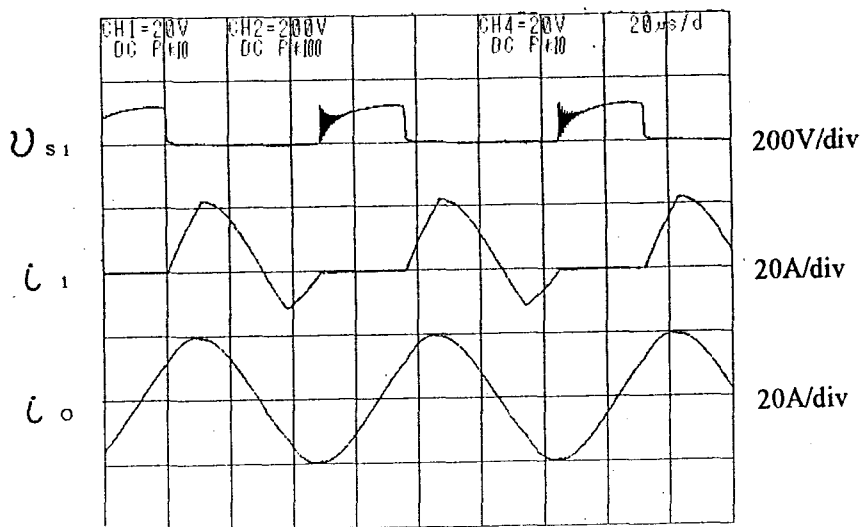
$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.1 kHz$
 $t = 12.9^\circ C$

$I_d = 14.54 A$
 $E_d = 75.89 V$
 $P_o = 690 w$
 $I_o = 16.18 A$
 $V_o = 219.0 V$



$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.1 kHz$
 $t = 29.0^\circ C$

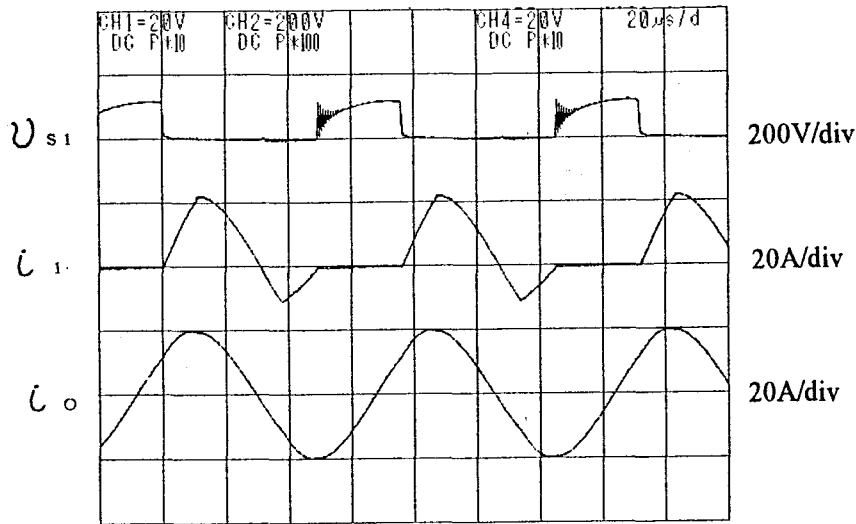
$I_d = 17.86 A$
 $E_d = 78.93 V$
 $P_o = 1000 w$
 $I_o = 19.94 A$
 $V_o = 281.2 V$



$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.1 kHz$
 $t = 42.3^\circ C$

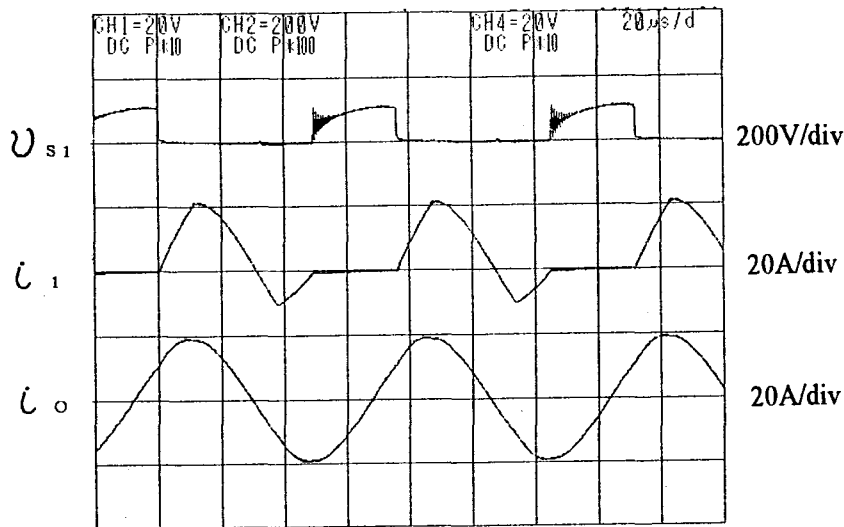
$I_d = 17.42 A$
 $E_d = 77.88 V$
 $P_o = 939 w$
 $I_o = 19.69 A$
 $V_o = 280.3 V$

図 44-14 動作波形



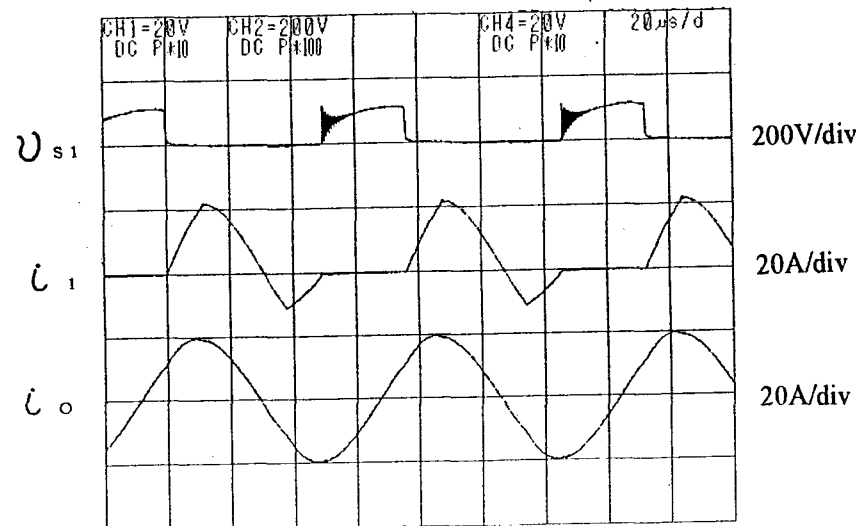
$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.1 kHz$
 $t = 478^\circ C$

$I_a = 17.54 A$
 $E_a = 74.52 V$
 $P_o = 935 w$
 $I_o = 19.79 A$
 $V_o = 285.0 V$



$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.1 kHz$
 $t = 500^\circ C$

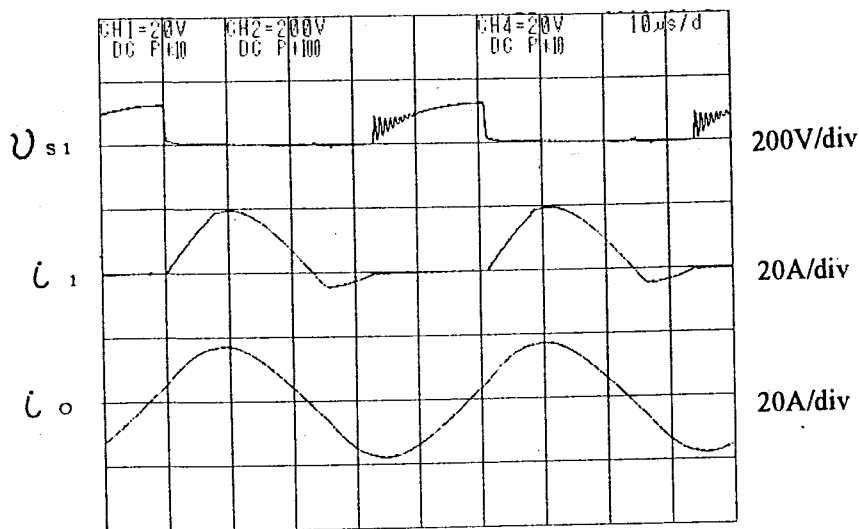
$I_a = 16.94 A$
 $E_a = 70.52 V$
 $P_o = 865 w$
 $I_o = 19.48 A$
 $V_o = 276.0 V$



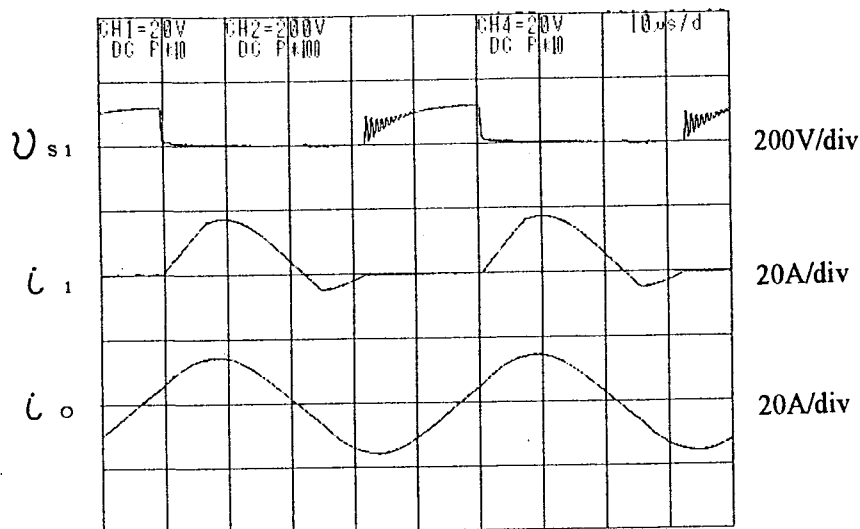
$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.66 \mu F$
 $f_o = 13.1 kHz$
 $t = 550^\circ C$

$I_a = 17.07 A$
 $E_a = 71.3 V$
 $P_o = 867 w$
 $I_o = 19.48 A$
 $V_o = 282.8 V$

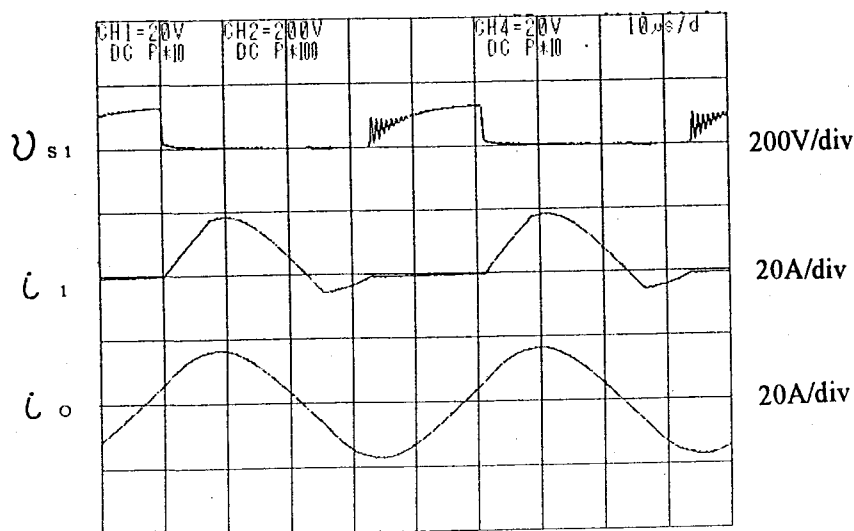
図 44-15 動作波形



$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.315 \mu F$
 $f_o = 19.68 kHz$
 $t = 234^\circ C$
 $P_{in} = 804.1 w$
 $I_d = 14.06 A$
 $E_d = 74.77 V$
 $P_o = 936 w$
 $I_o = 14.92 A$
 $V_o = 302.5 V$

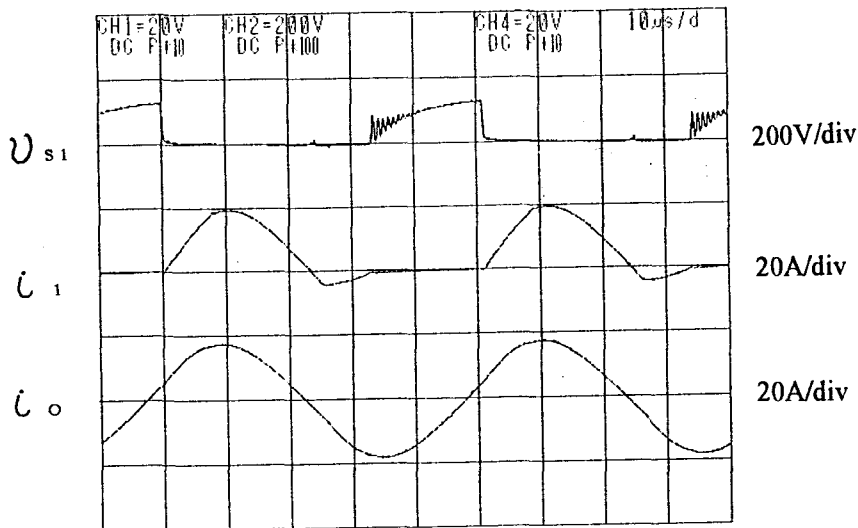


$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.315 \mu F$
 $f_o = 19.68 kHz$
 $t = 400^\circ C$
 $P_{in} = 914.1 w$
 $I_d = 15.54 A$
 $E_d = 75.92 V$
 $P_o = 1080 w$
 $I_o = 16.52 A$
 $V_o = 341.0 V$

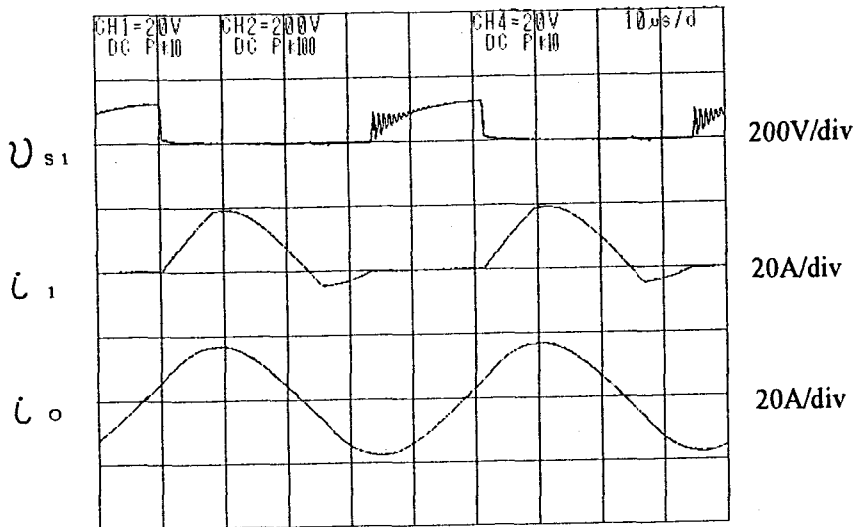


$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.315 \mu F$
 $f_o = 19.68 kHz$
 $t = 500^\circ C$
 $P_{in} = 976.8 w$
 $I_d = 16.46 A$
 $E_d = 75.0 V$
 $P_o = 1170 w$
 $I_o = 17.38 A$
 $V_o = 367.0 V$

図 4 4 - 1 6 動作波形

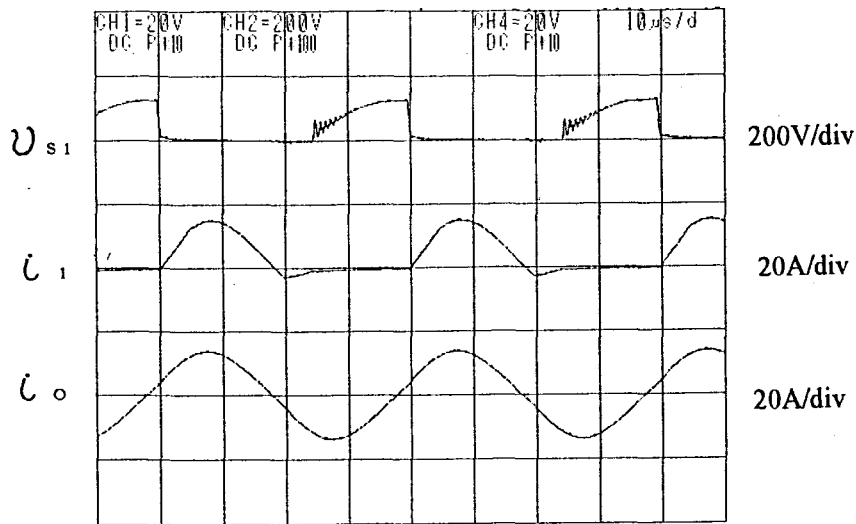


$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.315 \mu F$
 $f_o = 19.68 kHz$
 $t = 550^\circ C$
 $P_{in} = 983 w$
 $I_d = 16.69 A$
 $E_d = 73.64 V$
 $P_o = 1190 w$
 $I_o = 17.56 A$
 $V_o = 369.1 V$

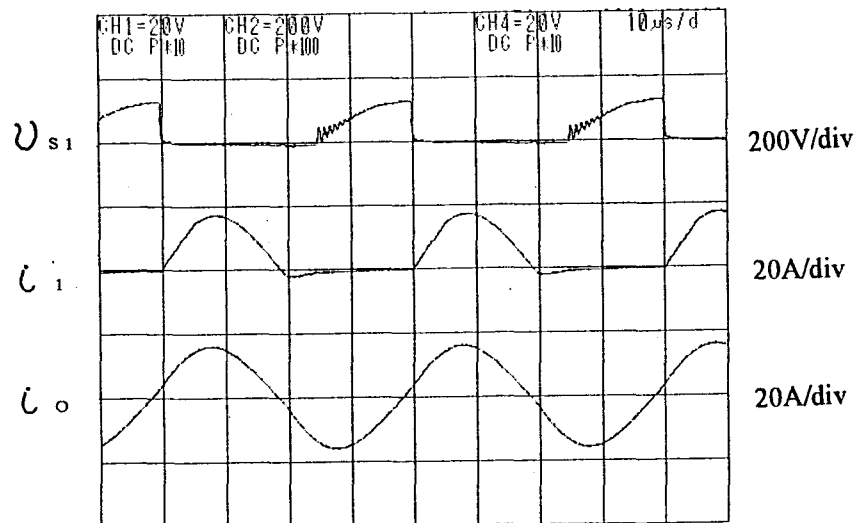


$\alpha = 0.16$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.315 \mu F$
 $f_o = 19.68 kHz$
 $t = 577^\circ C$
 $P_{in} = 902.7 w$
 $I_d = 15.90 A$
 $E_d = 75.52 V$
 $P_o = 1090 w$
 $I_o = 16.95 A$
 $V_o = 355.7 V$

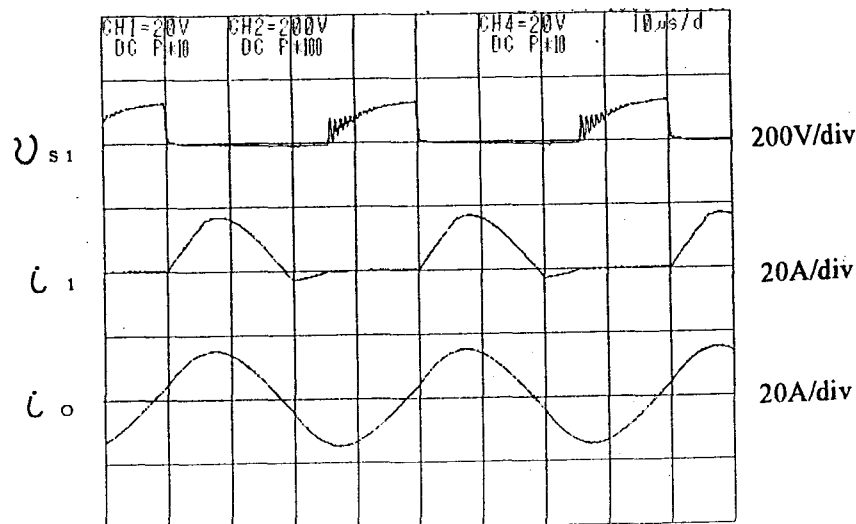
図 44-17 動作波形



$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.19$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 24.87 \text{ kHz}$
 $t = 216^\circ C$
 $P_{in} = 834 \text{ w}$
 $I_d = 13.17 \text{ A}$
 $E_d = 76.67 \text{ V}$
 $P_o = 1030 \text{ w}$
 $I_o = 13.48 \text{ A}$
 $V_o = 339.5 \text{ V}$

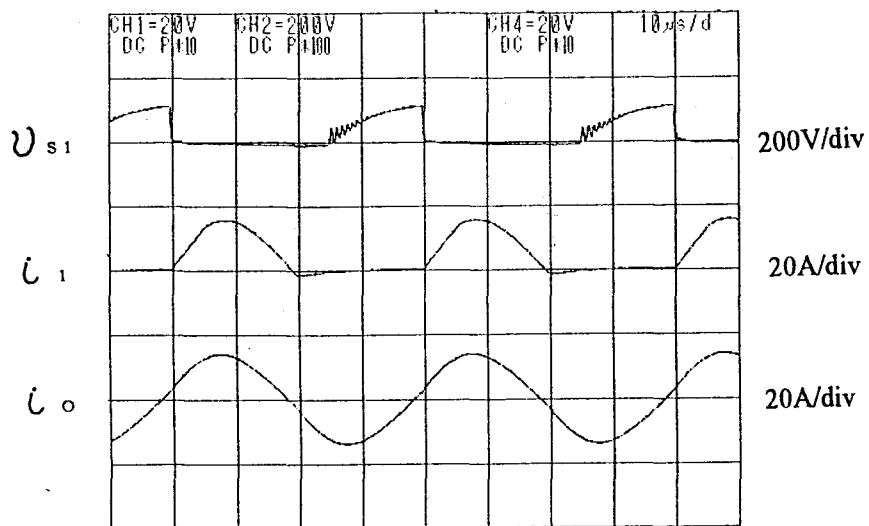


$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.19$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 24.87 \text{ kHz}$
 $t = 511^\circ C$
 $P_{in} = 996.6 \text{ w}$
 $I_d = 15.33 \text{ A}$
 $E_d = 76.99 \text{ V}$
 $P_o = 1270 \text{ w}$
 $I_o = 15.56 \text{ A}$
 $V_o = 404.3 \text{ V}$

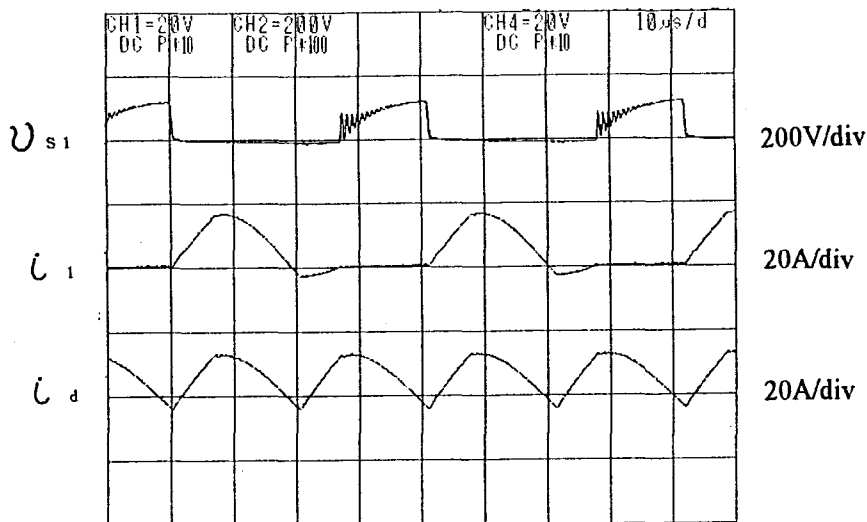


$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.19$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 24.87 \text{ kHz}$
 $t = 550^\circ C$
 $P_{in} = 1021.2 \text{ w}$
 $I_d = 15.66 \text{ A}$
 $E_d = 76.61 \text{ V}$
 $P_o = 1310 \text{ w}$
 $I_o = 15.83 \text{ A}$
 $V_o = 412.6 \text{ V}$

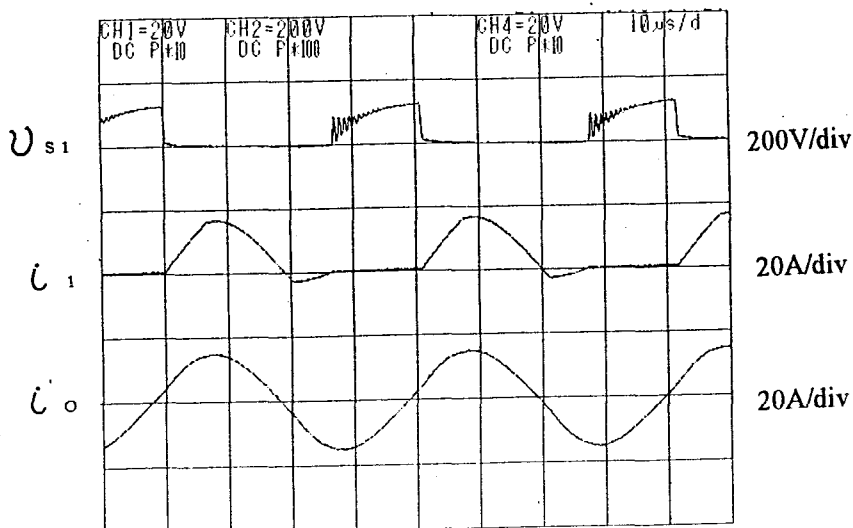
図 4 4 - 1 8 動作波形



$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.19$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 24.87 \text{ kHz}$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 974.5 \text{ w}$
 $I_d = 15.21 \text{ A}$
 $E_d = 75.38 \text{ V}$
 $P_o = 1250 \text{ w}$
 $I_o = 15.4 \text{ A}$
 $V_o = 400.9 \text{ V}$



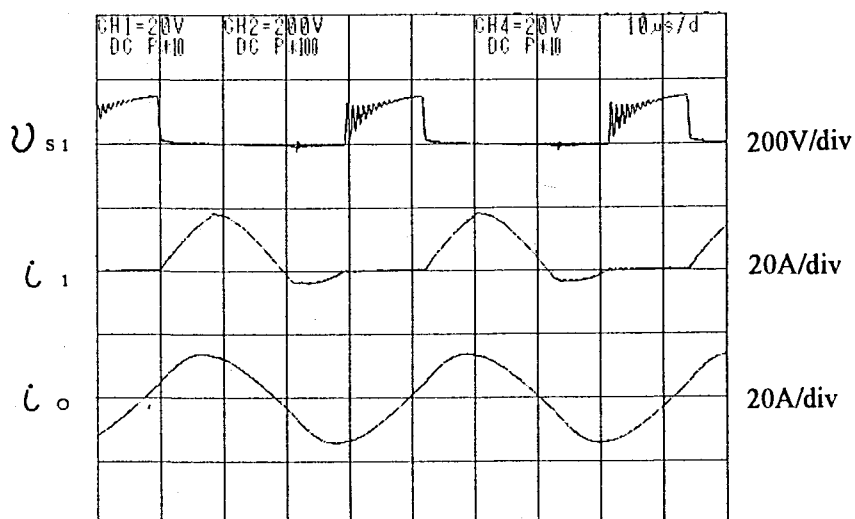
$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.19$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 24.87 \text{ kHz}$
 $t = 626^\circ C$
 $P_{in} = 757.1 \text{ w}$
 $I_d = 13.23 \text{ A}$
 $E_d = 68.4 \text{ V}$
 $P_o = 960 \text{ w}$
 $I_o = 13.53 \text{ A}$
 $V_o = 349.2 \text{ V}$



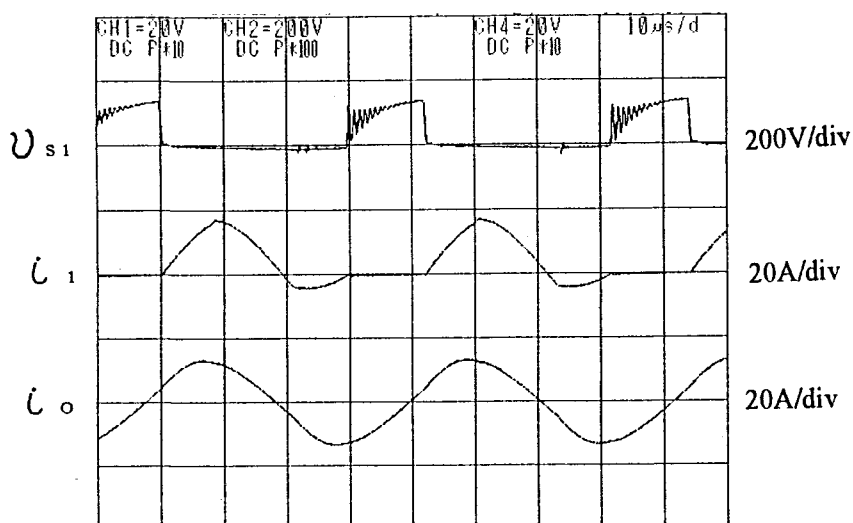
$\alpha = 0.07$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.19$
 $L_o = 175 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 24.87 \text{ kHz}$
 $t = 543^\circ C$

* (L_o , L_d に変化)

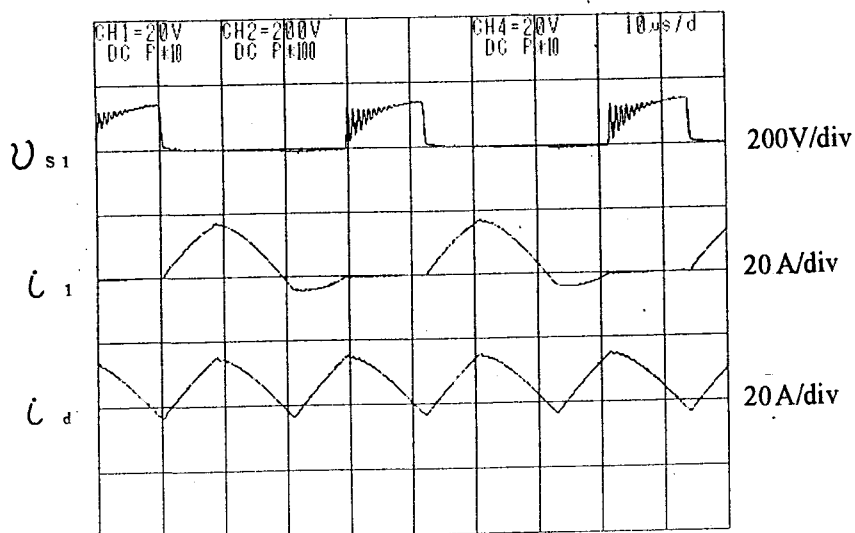
図 4 4 - 1 9 動作波形



$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.8 kHz$
 $t = 555^\circ C$
 $P_{in} = 885.3 w$
 $I_d = 14.17 A$
 $E_d = 78.24 V$
 $P_o = 1170 w$
 $I_o = 15.85 A$
 $V_o = 420.3 V$

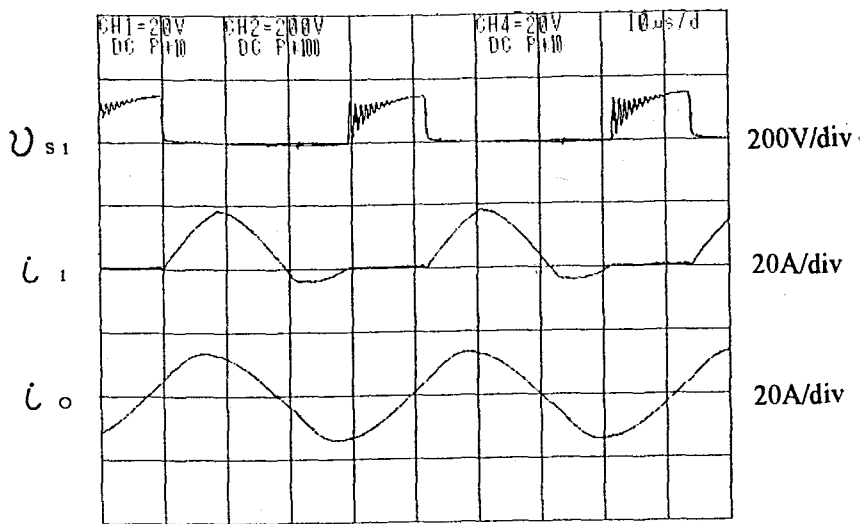


$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.8 kHz$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 777.7 w$
 $I_d = 13.21 A$
 $E_d = 74.39 V$
 $P_o = 1070 w$
 $I_o = 14.92 A$
 $V_o = 395.3 V$

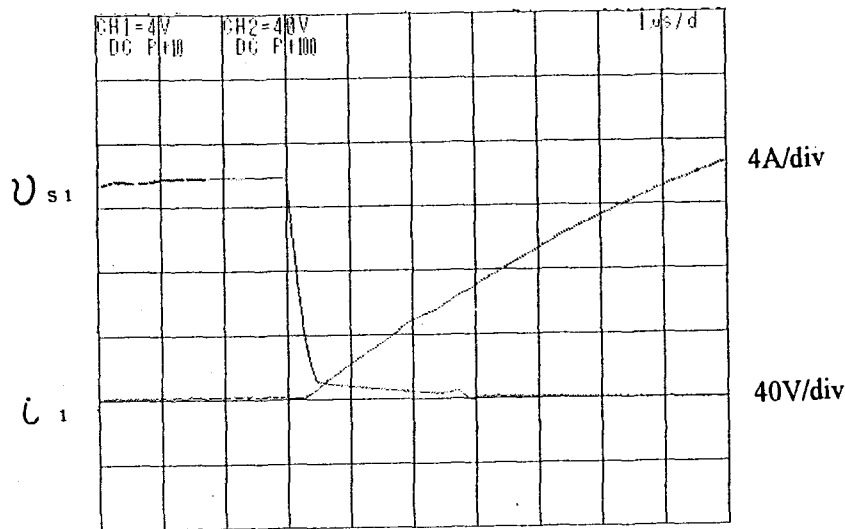


$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.8 kHz$
 $t = 604 \sim 621^\circ C$
 $P_{in} = 774 w$
 $I_d = 13.19 A$
 $E_d = 74.16 V$
 $P_o = 1040 w$
 $I_o = 14.84 A$
 $V_o = 394.5 V$

図 4 4 - 2 0 動作波形

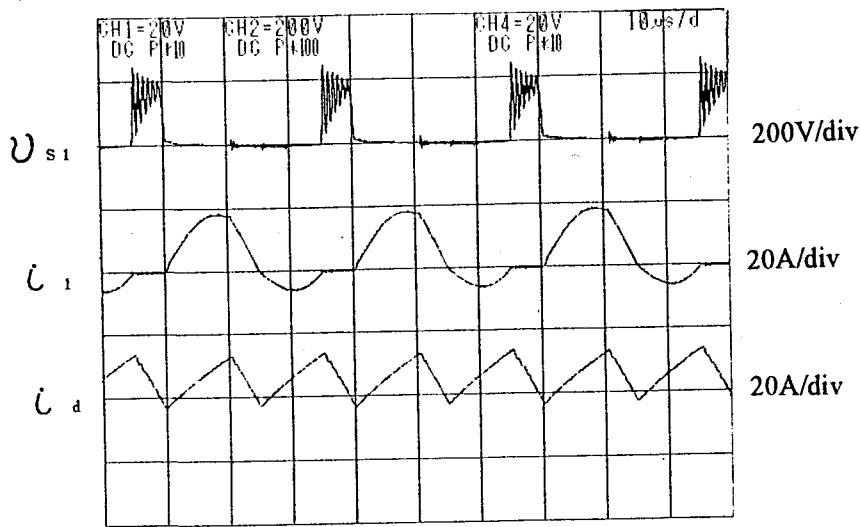


$\alpha = 0.15$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.8 kHz$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 850.2 w$
 $I_d = 13.78 A$
 $E_d = 78.3 V$
 $P_o = 1120 w$
 $I_o = 15.59 A$
 $V_o = 410.8 V$

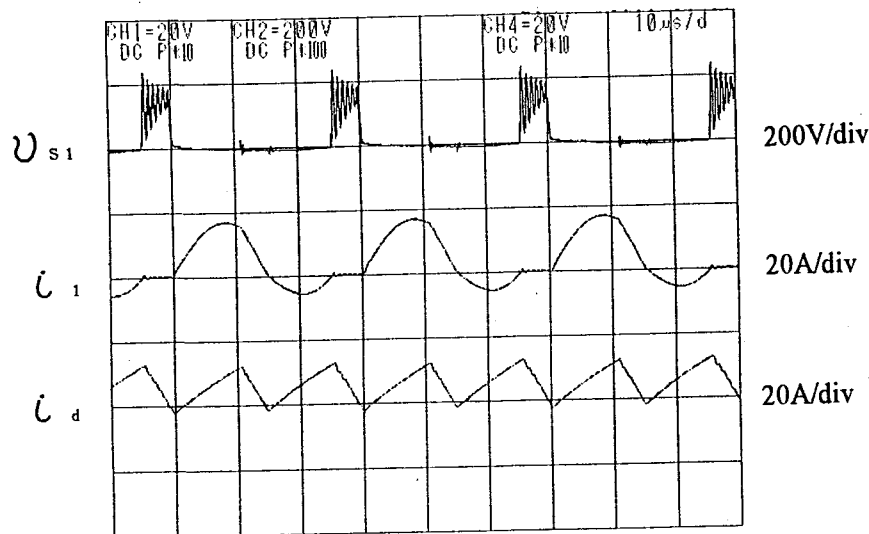


ターンオン波形

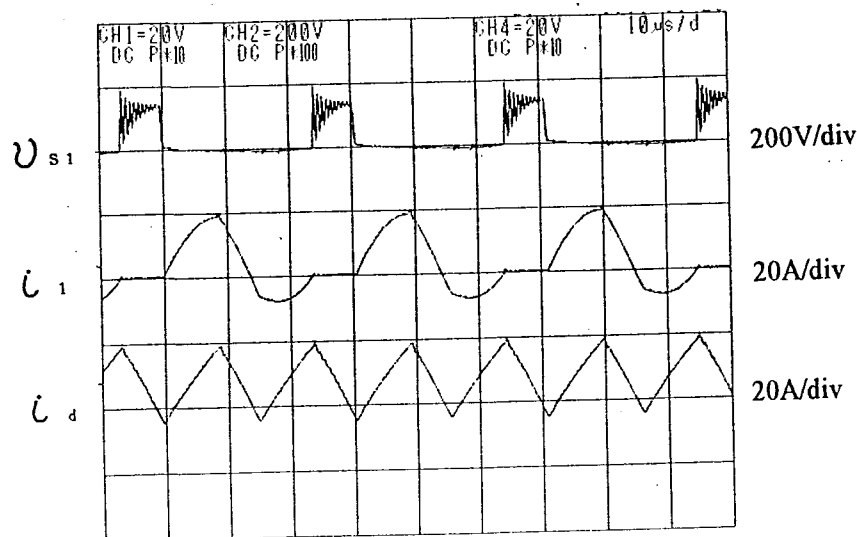
図 4 4 - 2 1 動作波形



$\alpha = 0.28$
 $\mu = 0.86$
 $\lambda = 0.12$
 $L_o = 86.6 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 33.33 kHz$
 $t = 217^\circ C$
 $P_{in} = 714.7 w$
 $I_d = 15.46 A$
 $E_d = 55.54 V$
 $P_o = 1250 w$
 $I_o = 21.92 A$
 $V_o = 409.4 V$

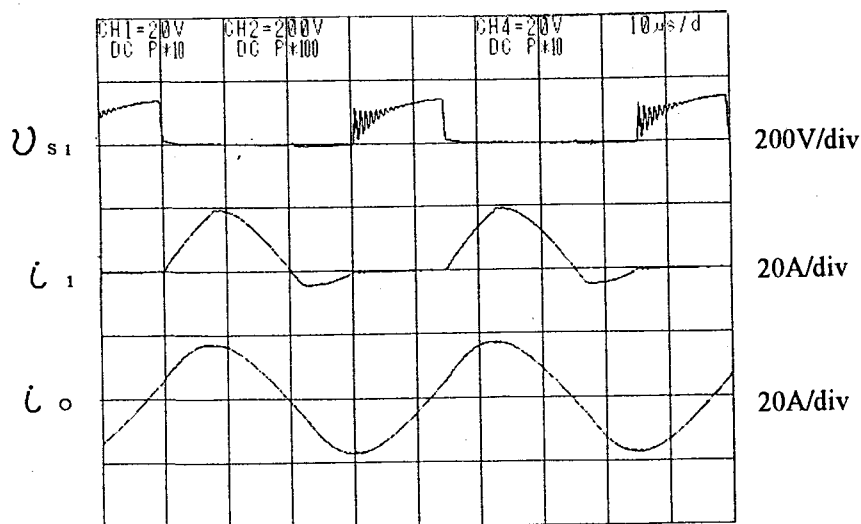


$\alpha = 0.28$
 $\mu = 0.86$
 $\lambda = 0.12$
 $L_o = 86.6 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 33.11 kHz$
 $t = 400^\circ C$
 $P_{in} = 524.2 w$
 $I_d = 12.95 A$
 $E_d = 49.52 V$
 $P_o = 970 w$
 $I_o = 19.71 A$
 $V_o = 370.9 V$

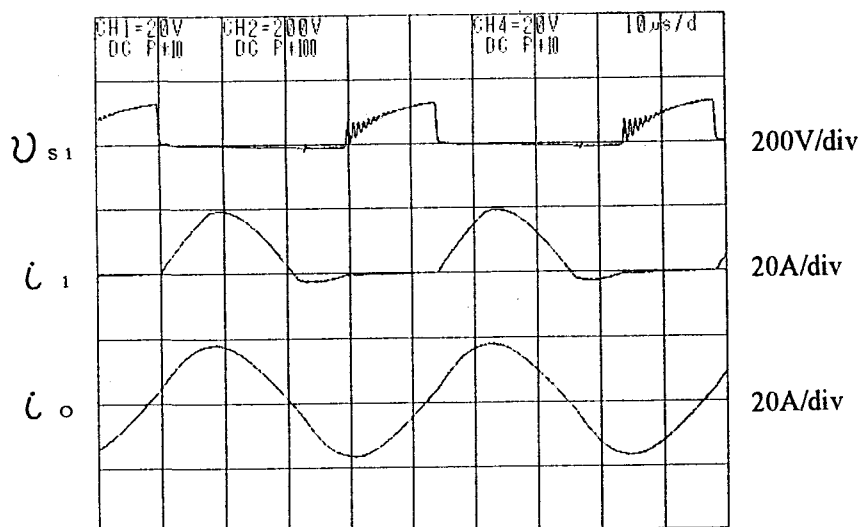


$\alpha = 0.28$
 $\mu = 0.86$
 $\lambda = 0.12$
 $L_o = 86.6 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 32.67 kHz$
 $t = 400^\circ C$
 $P_{in} = 518.9 w$
 $I_d = 12.99 A$
 $E_d = 62.36 V$
 $P_o = 980 w$
 $I_o = 19.93 A$
 $V_o = 368.8 V$

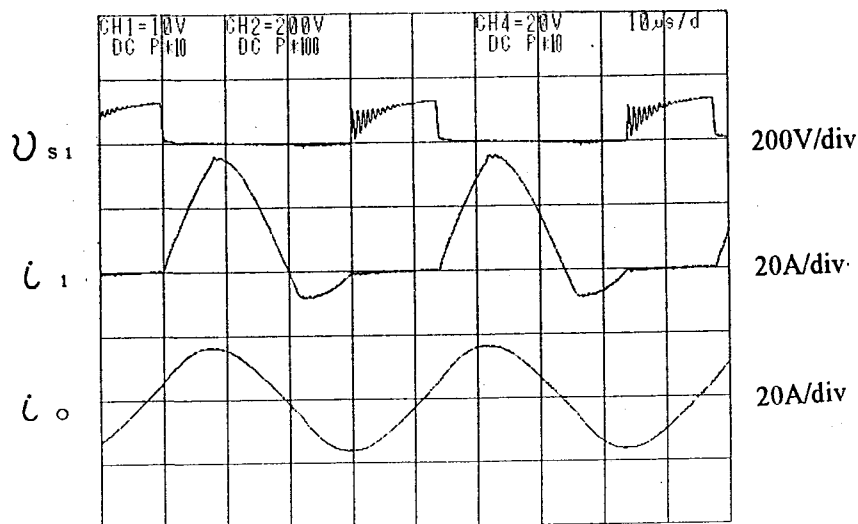
図 4 4 - 2 2 動作波形



$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.42 \text{ kHz}$
 $t = 288^\circ C$
 $P_{in} = 886.5 \text{ w}$
 $I_d = 14.45 \text{ A}$
 $E_d = 77.13 \text{ V}$
 $P_o = 1100 \text{ w}$
 $I_o = 15.44 \text{ A}$
 $V_o = 378.1 \text{ V}$

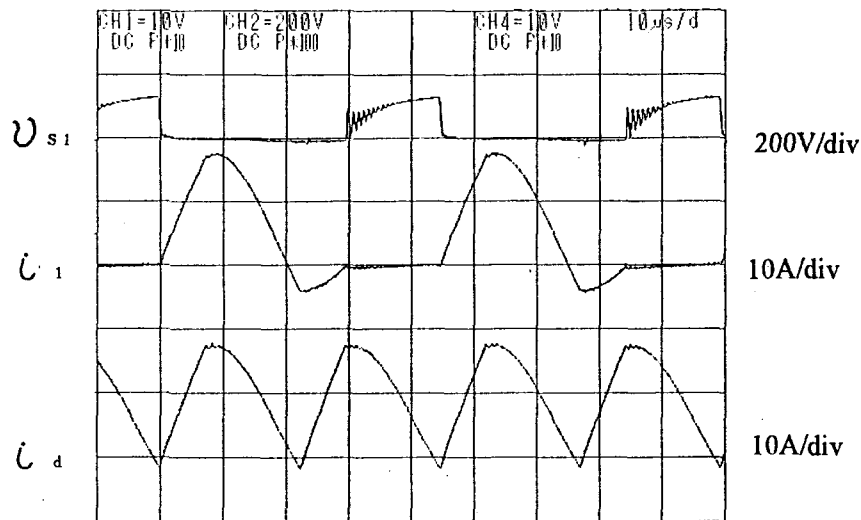


$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.42 \text{ kHz}$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 937.5 \text{ w}$
 $I_d = 15.82 \text{ A}$
 $E_d = 71.82 \text{ V}$
 $P_o = 1210 \text{ w}$
 $I_o = 16.7 \text{ A}$
 $V_o = 413.7 \text{ V}$

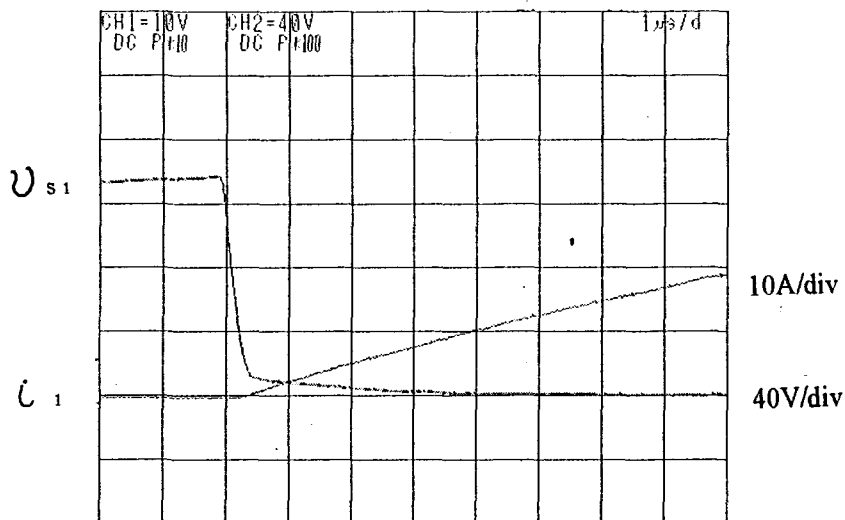


$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.42 \text{ kHz}$
 $t = 650^\circ C$
 $P_{in} = 853.6 \text{ w}$
 $I_d = 14.90 \text{ A}$
 $E_d = 71.1 \text{ V}$
 $P_o = 1100 \text{ w}$
 $I_o = 16.1 \text{ A}$
 $V_o = 393.8 \text{ V}$

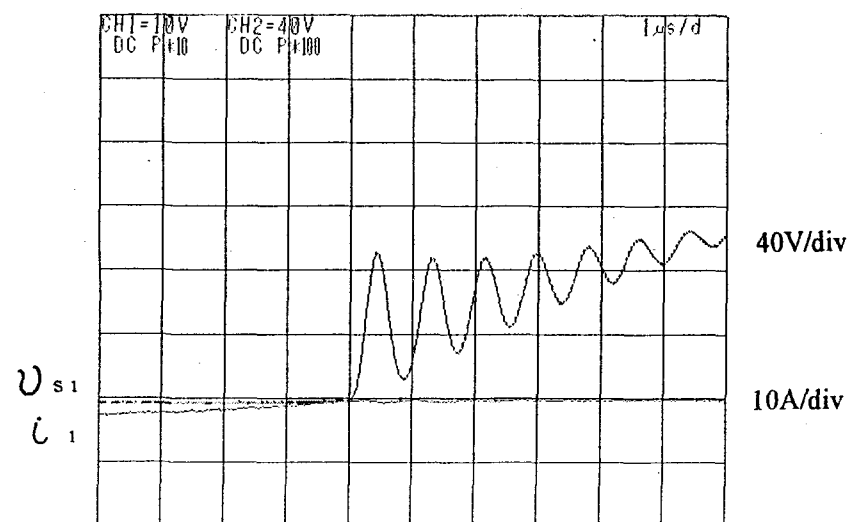
図 4 4 - 2 3 動作波形



$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.42 kHz$
 $t = 288^\circ C$
 $P_{in} = 886.5 w$
 $I_d = 14.45 A$
 $E_d = 77.13 V$
 $P_o = 1100 w$
 $I_o = 15.44 A$
 $V_o = 378.1 V$

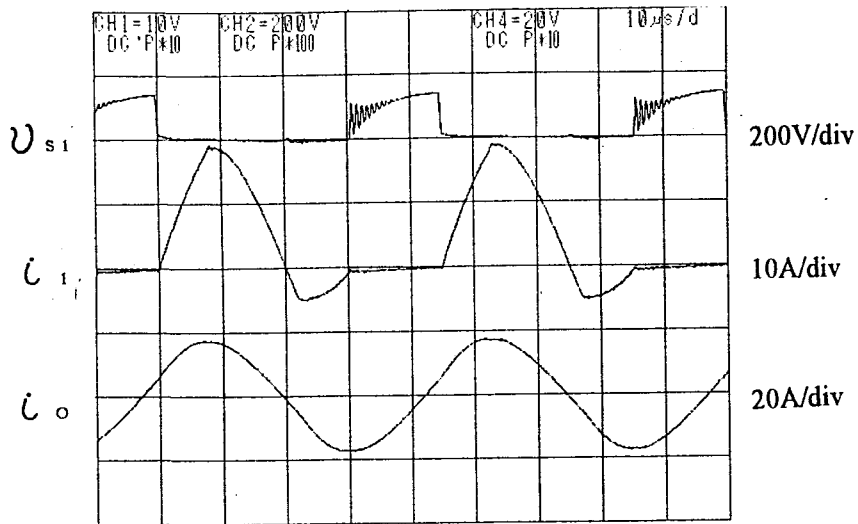


ターンオン波形

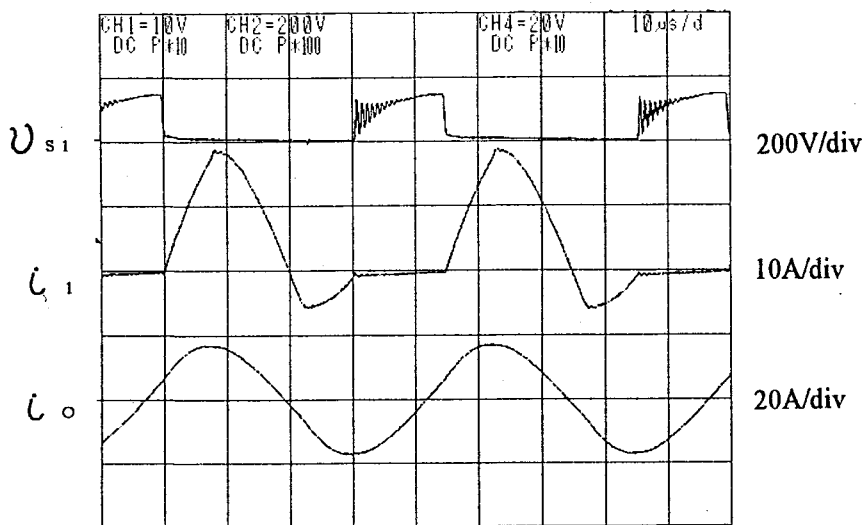


ターンオフ波形

図 4 4 - 2 4 動作波形

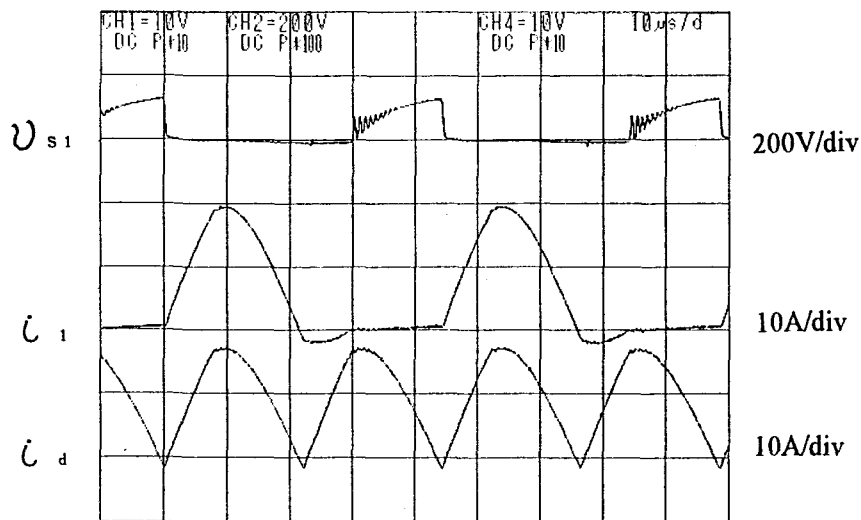


$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.32 kHz$
 $t = 500^\circ C$
 $P_{in} = 914.2 w$
 $I_d = 15.1 A$
 $E_d = 78.07 V$
 $P_o = 1180 w$
 $I_o = 16.71 A$
 $V_o = 413.5 V$

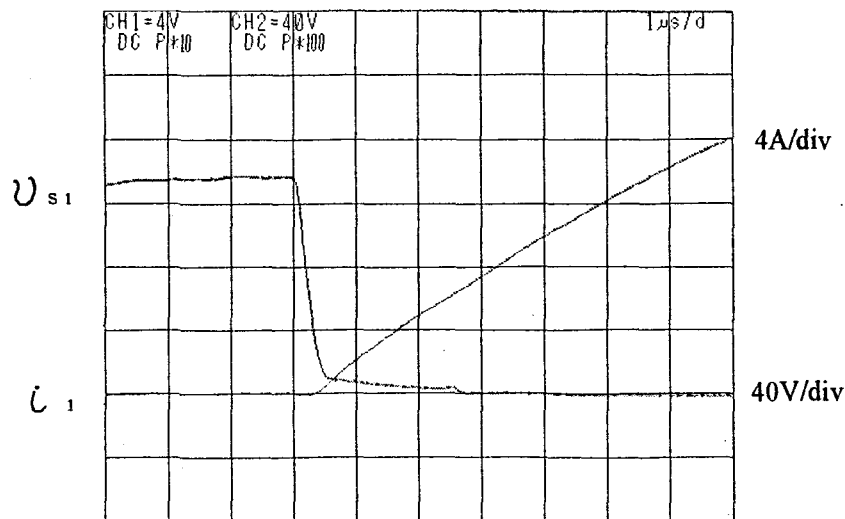


$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.32 kHz$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 881.3 w$
 $I_d = 14.66 A$
 $E_d = 79.03 V$
 $P_o = 1150 w$
 $I_o = 16.46 A$
 $V_o = 402.7 V$

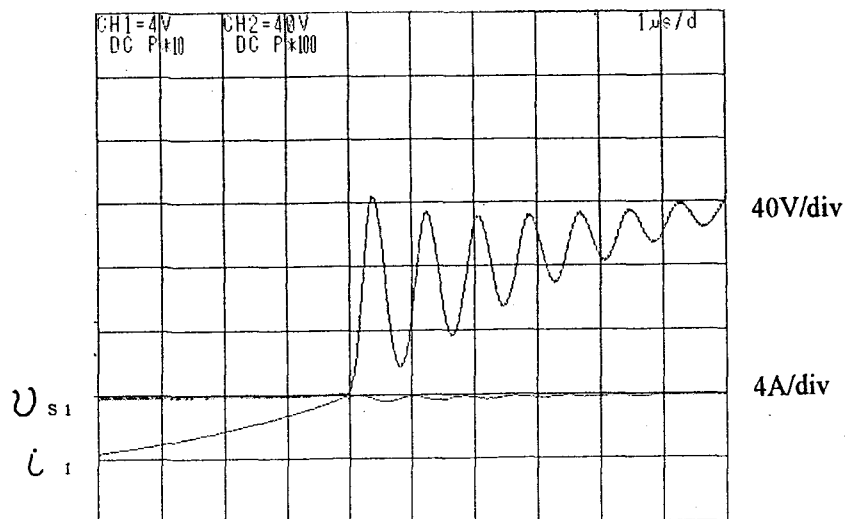
図 4 4 - 2 5 動作波形



$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.32 kHz$
 $t = 500^\circ C$
 $P_{in} = 914.2 w$
 $I_a = 15.1 A$
 $E_d = 78.07 V$
 $P_o = 1180 w$
 $I_o = 16.71 A$
 $V_o = 413.5 V$

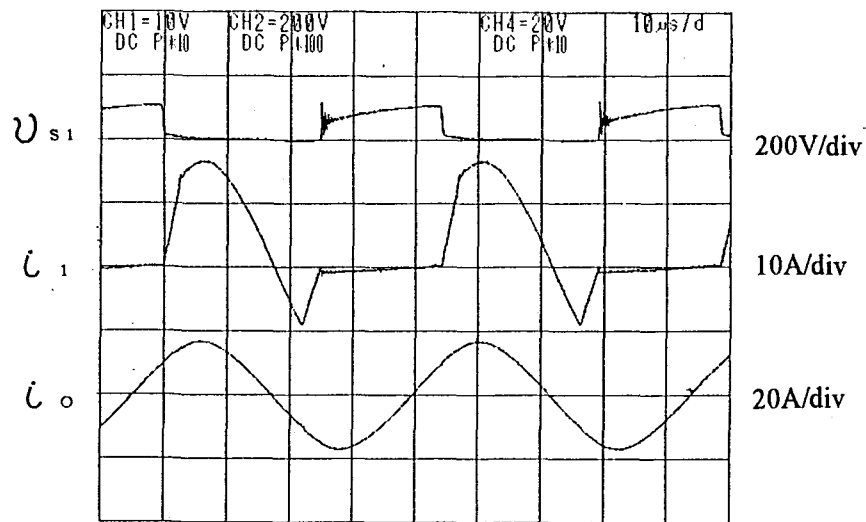


ターンオン波形

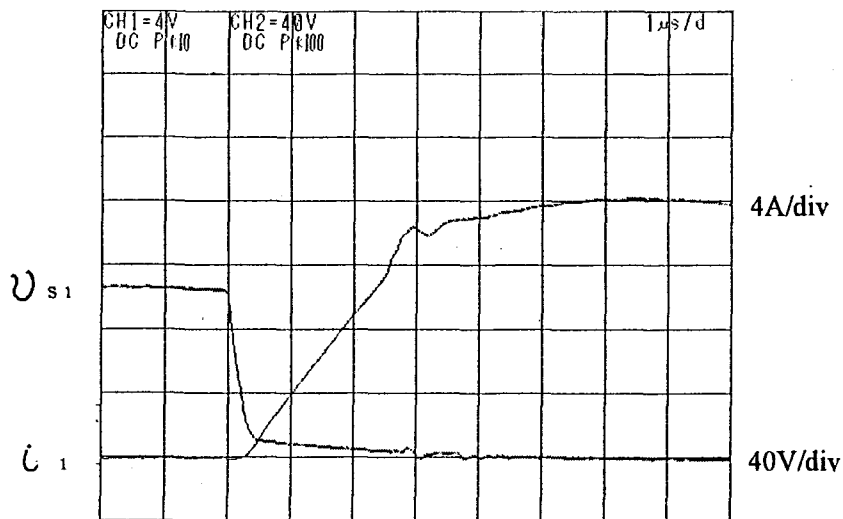


ターンオフ波形

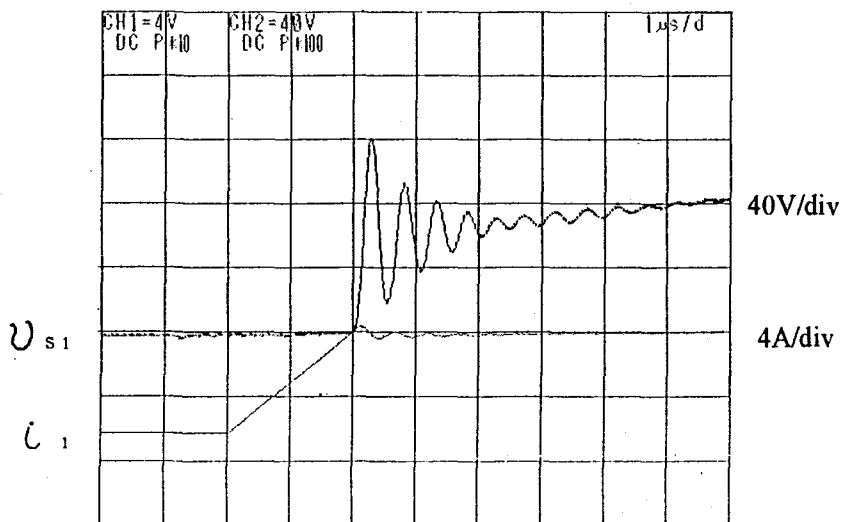
図44-26 動作波形



$\alpha = 0$
 $\mu = 0.83$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 150 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.52 kHz$
 $t = 500^\circ C$
 $P_{in} = 883.4 w$
 $I_d = 15.85 A$
 $E_d = 83.6 V$
 $P_o = 1200 w$
 $I_o = 16.52 A$
 $V_o = 414.0 V$

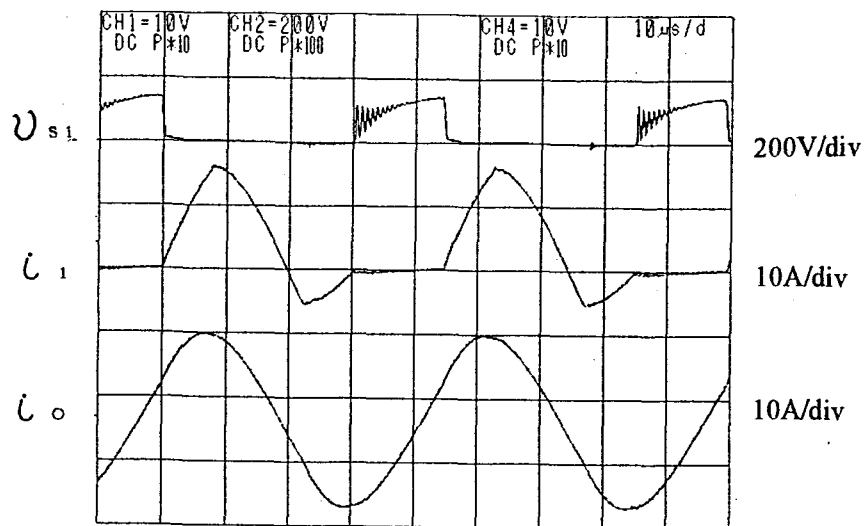


ターンオン波形

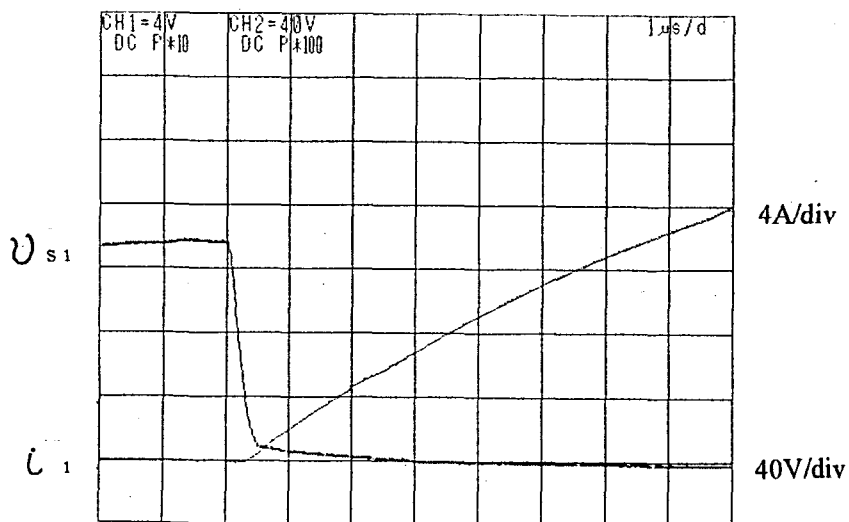


ターンオフ波形

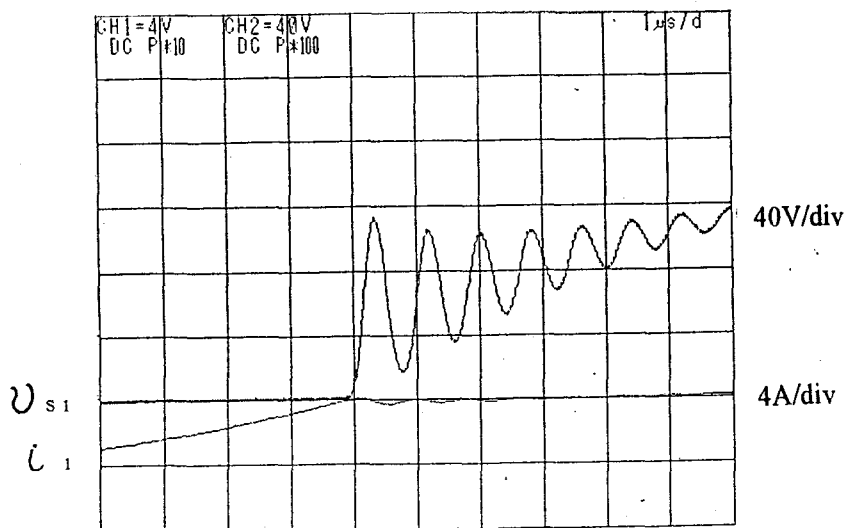
図 4 4 - 2 7 動作波形



$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.82$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 150 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.32 kHz$
 $t = 600 \sim 666^\circ C$
 $P_{in} = 882.9 w$
 $I_d = 14.76 A$
 $E_d = 79.86 V$
 $P_o = 1150 w$
 $I_o = 16.52 A$
 $V_o = 403.6 V$

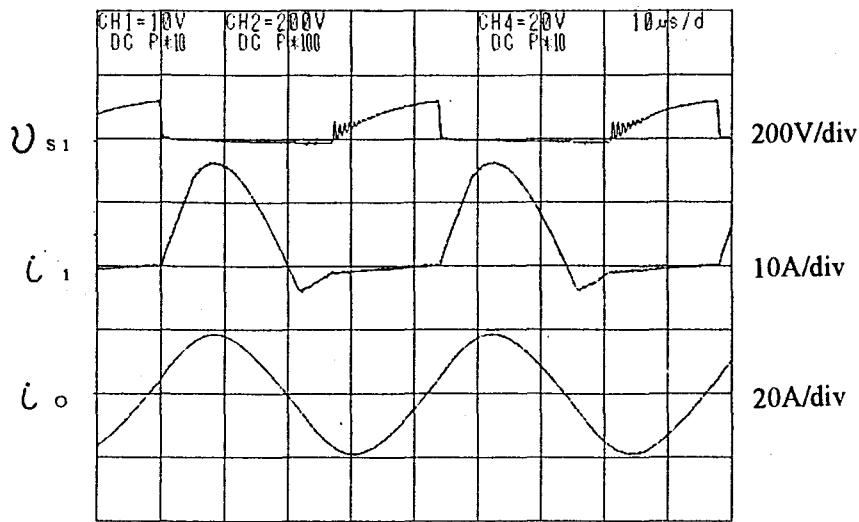


ターンオン波形

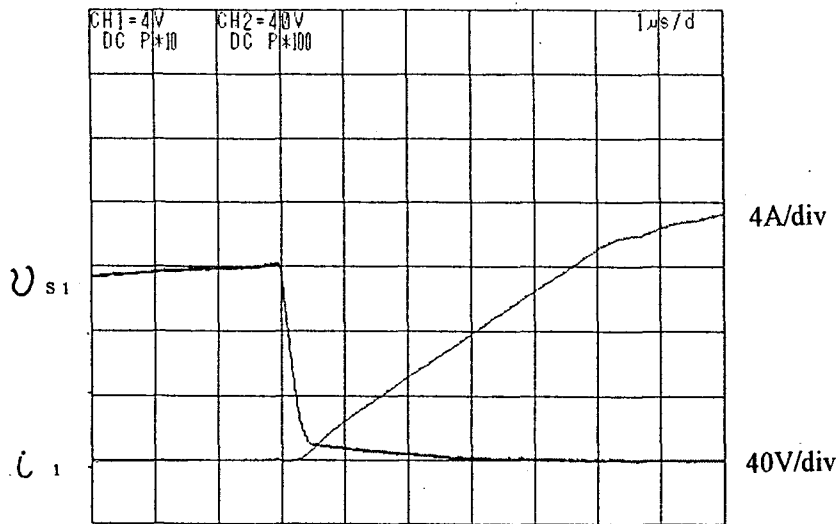


ターンオフ波形

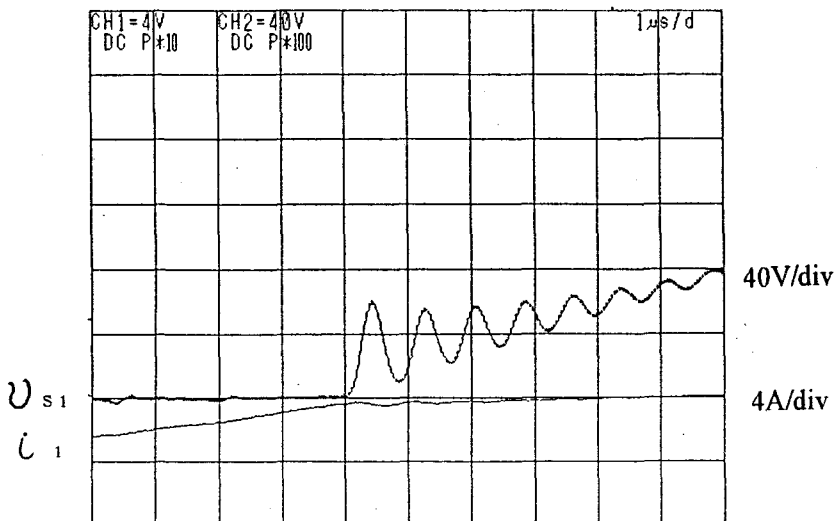
図 4 4 - 2 8 動作波形



$\alpha = 0.13$
 $\mu = 0.84$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 150 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 22.83 kHz$
 $t = 650^\circ C$
 $P_{in} = 838.5 w$
 $I_d = 14.89 A$
 $E_d = 75.81 V$
 $P_o = 1110 w$
 $I_o = 16.01 A$
 $V_o = 389.2 V$

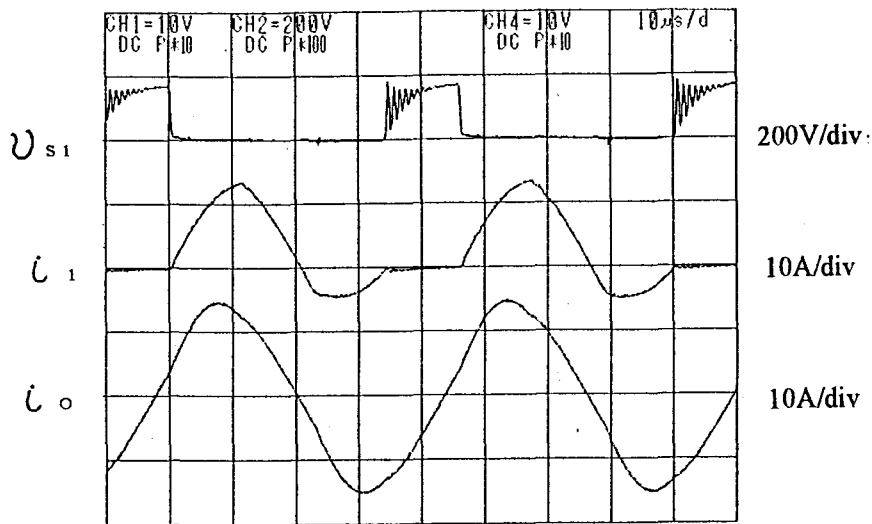


ターンオン波形



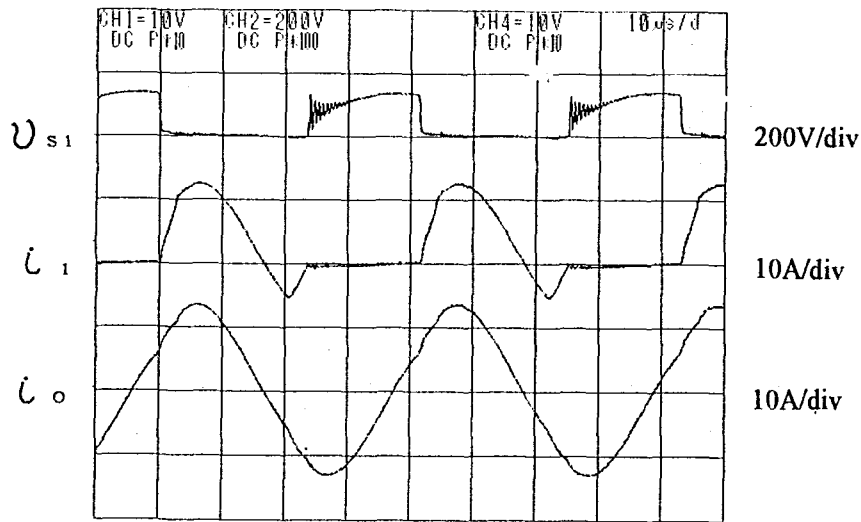
ターンオフ波形

図 4 4 - 2 9 動作波形

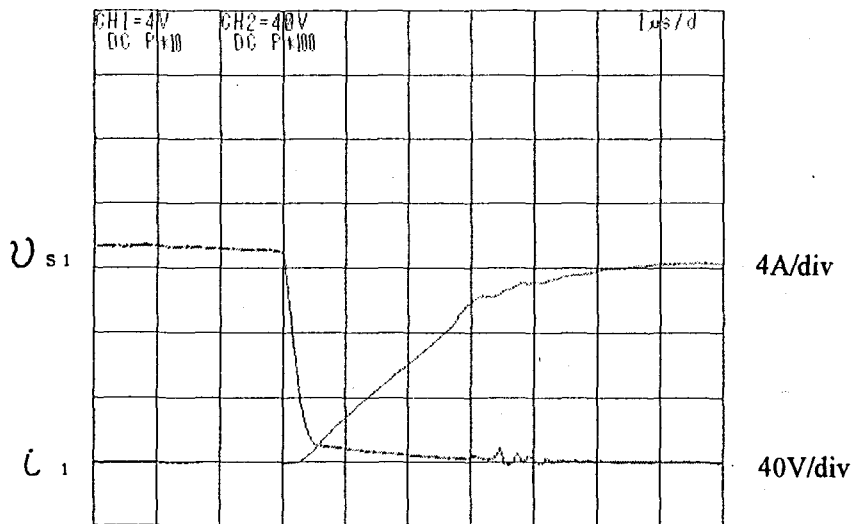


$\alpha = 0.2$
 $\mu = 0.81$
 $\lambda = 0.17$
 $L_o = 149 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 21.95 kHz$
 $P_{in} = 803.6 w$
 $I_d = 12.54 A$
 $E_d = 80.0 V$
 $P_o = 1050 w$
 $I_o = 15.7 A$
 $V_o = 385.0 V$

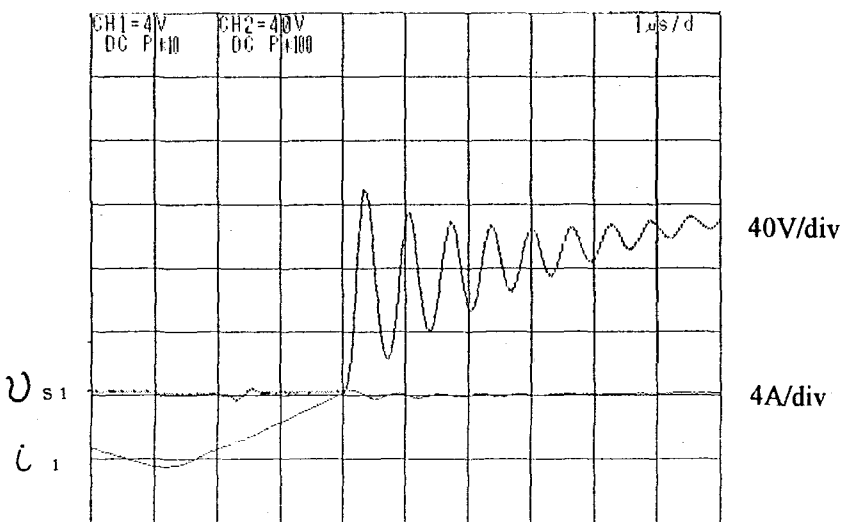
図 4 4-30 動作波形



$\alpha = 0.14$
 $\mu = 0.87$
 $\lambda = 0.28$
 $L_o = 142.1 \mu H$
 $C_o = 0.23 \mu F$
 $f_o = 24.15 kHz$
 $t = 62.1^\circ C$
 $P_{in} = 950.3 w$
 $I_d = 12.08 A$
 $E_d = 106.15 V$
 $P_o = 1085 w$
 $I_o = 12.54 A$
 $V_o = 264.3 V$

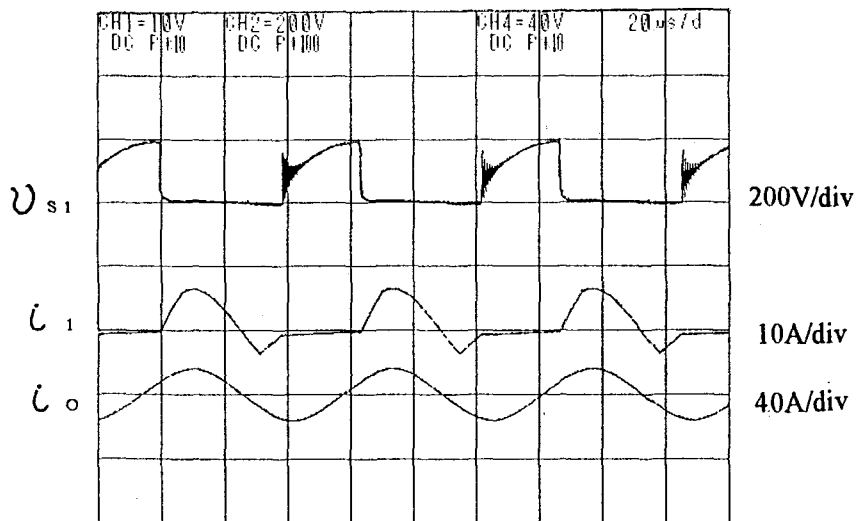


ターンオン波形



ターンオフ波形

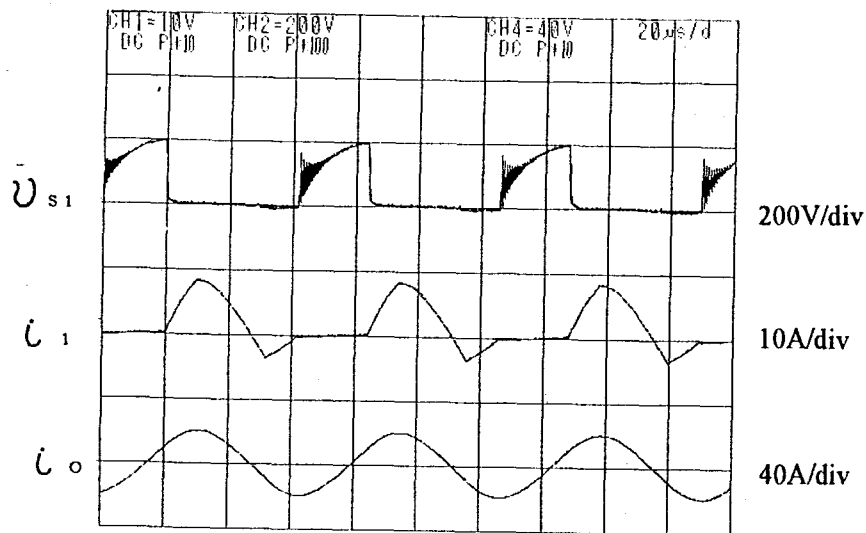
図 4 4 - 3 1 動作波形



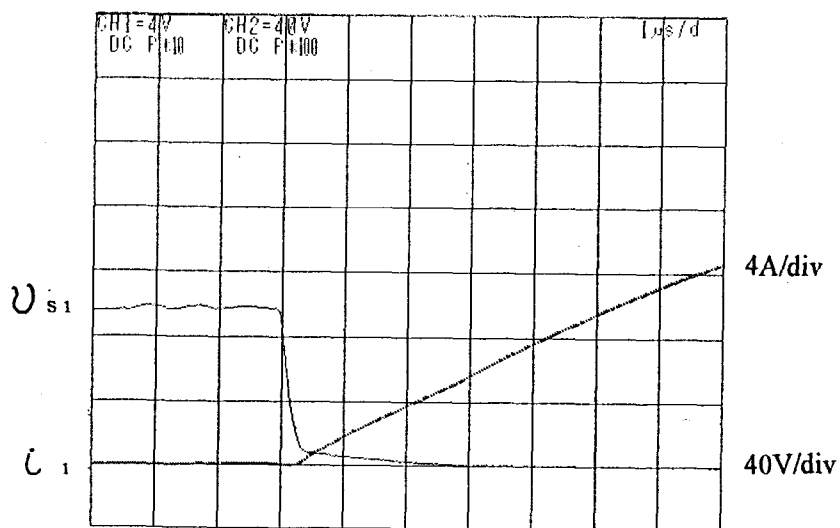
$\alpha = 0.09$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.18$
 $L_o = 220 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 15.9 kHz$
 $t = 89^\circ C$

$E_d = 65.0 V$
 $P_o = 97.0 W$
 $I_o = 15.0 A$
 $V_o = 378.0 V$

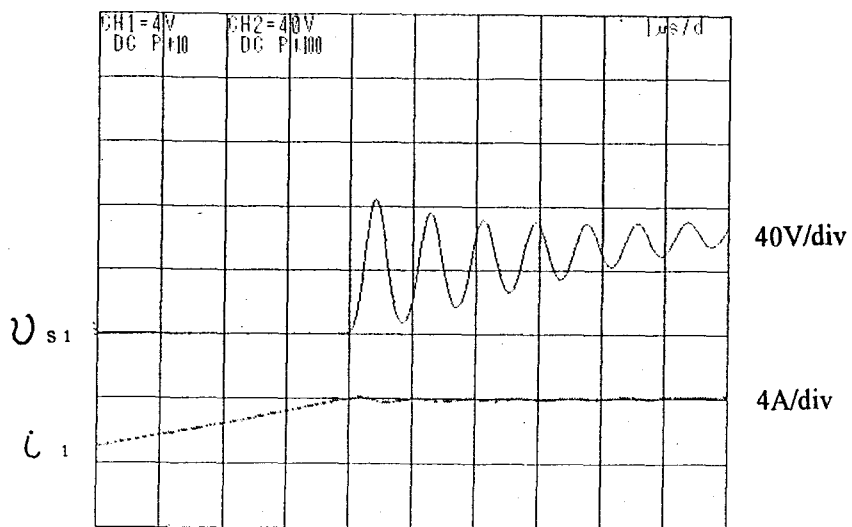
図 4 4 - 3 2 動作波形



$\alpha = 0.09$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.13$
 $L_o = 220 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 15.9 kHz$
 $t = 540^\circ C$
 $P_{in} = 762.7 w$
 $I_d = 17.55 A$
 $E_d = 59.19 V$
 $P_o = 1200 w$
 $I_o = 18.95 A$
 $V_o = 496.7 V$

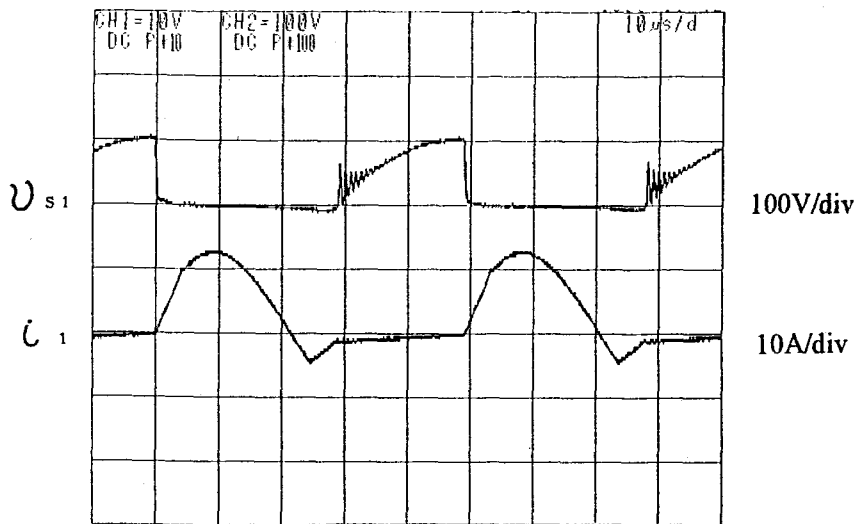


ターンオン波形



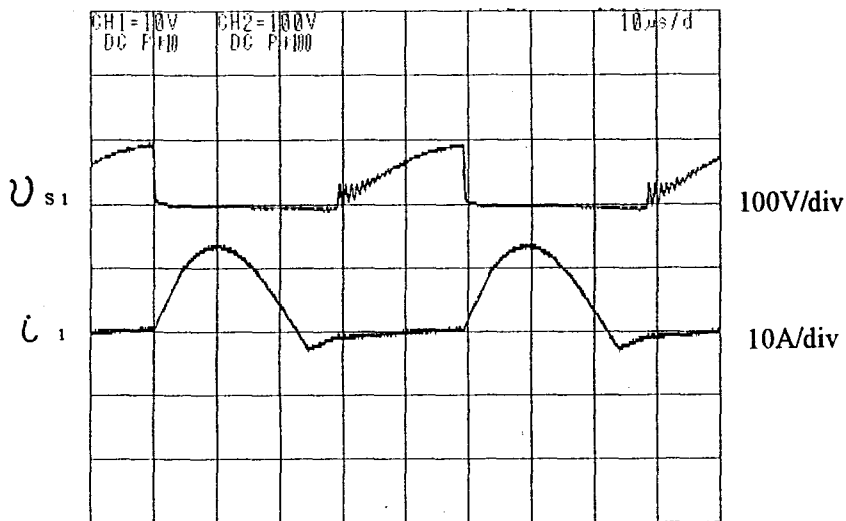
ターンオフ波形

図 4 4 - 3 3 動作波形



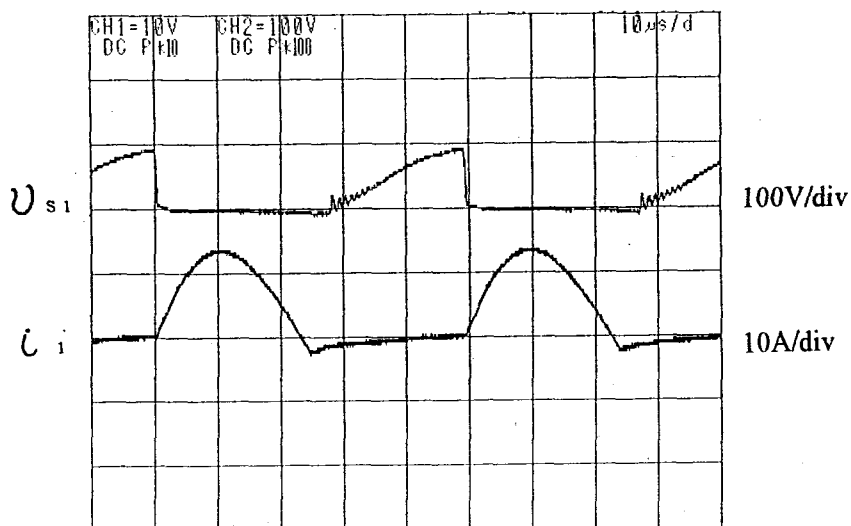
$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.09$
 $\lambda = 0.20$
 $L_o = 220 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.4 kHz$
 $t = 500^\circ C$

$E_d = 56.5 V$
 $P_o = 1200 w$
 $I_o = 15.16 A$
 $V_o = 513.3 V$



$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.09$
 $\lambda = 0.20$
 $L_o = 220 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.4 kHz$
 $t = 540^\circ C$

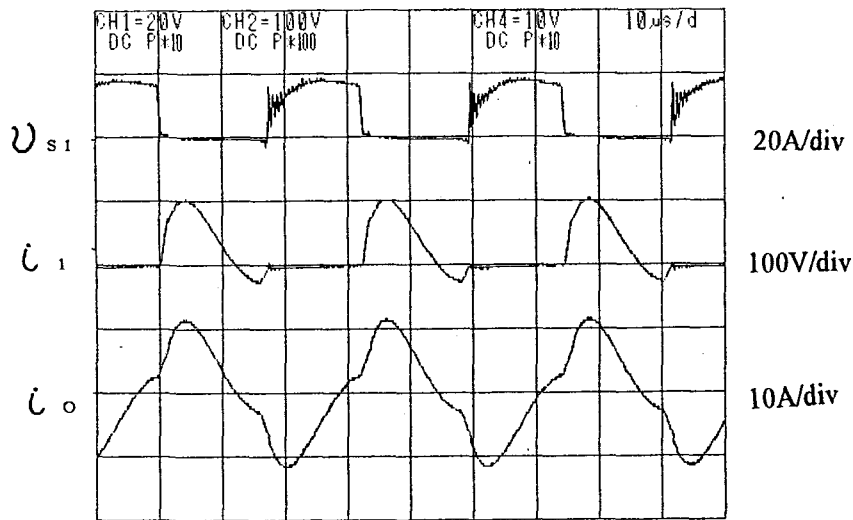
$E_d = 61.2 V$
 $P_o = 1340 w$
 $I_o = 16.4 A$
 $V_o = 553.1 V$



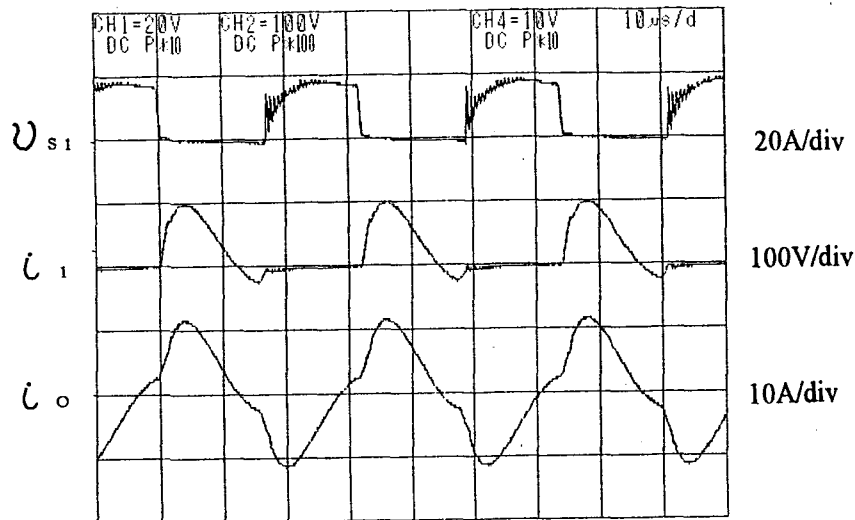
$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.09$
 $\lambda = 0.20$
 $L_o = 220 \mu H$
 $C_o = 0.33 \mu F$
 $f_o = 20.4 kHz$
 $t = 543^\circ C$

$E_d = 61.5 V$
 $P_o = 1350 w$
 $I_o = 16.5 A$
 $V_o = 557.0 V$

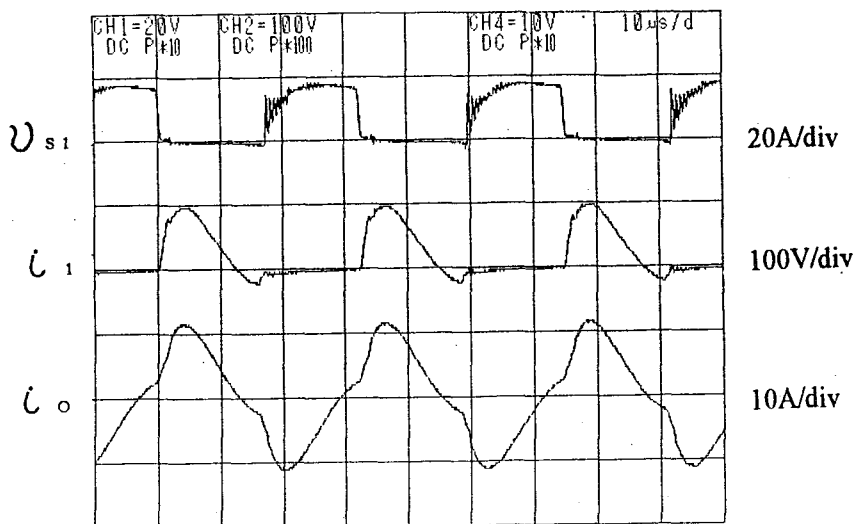
図44-34 動作波形



$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.23$
 $\lambda = 0.43$
 $L_o = 200 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 31.0 \text{ kHz}$
 $t = 200^\circ C$
 $P_{in} = 1154 \text{ w}$
 $I_d = 9.36 \text{ A}$
 $E_d = 162.1 \text{ V}$
 $P_o = 1211 \text{ w}$
 $I_o = 9.48 \text{ A}$
 $V_o = 158.9 \text{ V}$

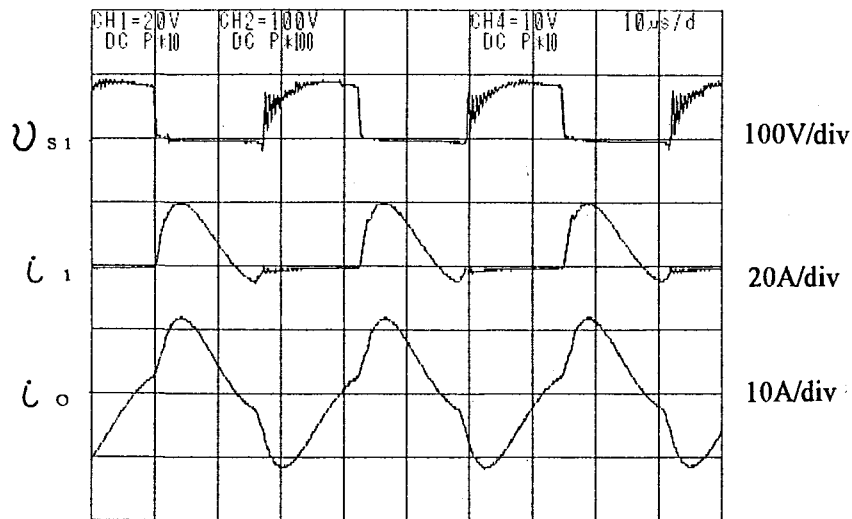


$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.23$
 $\lambda = 0.44$
 $L_o = 200 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 31.0 \text{ kHz}$
 $t = 400^\circ C$
 $P_{in} = 1217 \text{ w}$
 $I_d = 9.30 \text{ A}$
 $E_d = 162.1 \text{ V}$
 $P_o = 1233 \text{ w}$
 $I_o = 9.37 \text{ A}$
 $V_o = 162.9 \text{ V}$

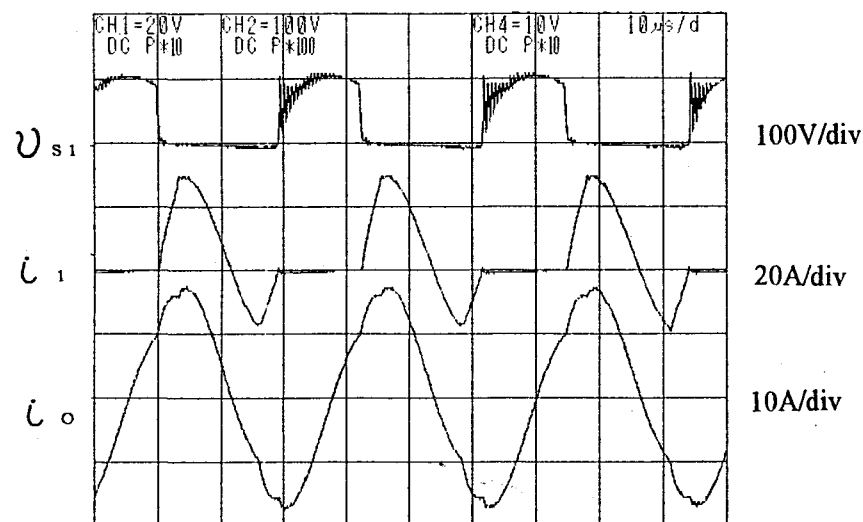


$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.23$
 $\lambda = 0.46$
 $L_o = 200 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 31.0 \text{ kHz}$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 1186 \text{ w}$
 $I_d = 9.23 \text{ A}$
 $E_d = 161.7 \text{ V}$
 $P_o = 1237 \text{ w}$
 $I_o = 9.26 \text{ A}$
 $V_o = 167.1 \text{ V}$

図 4 4 - 3 5 動作波形

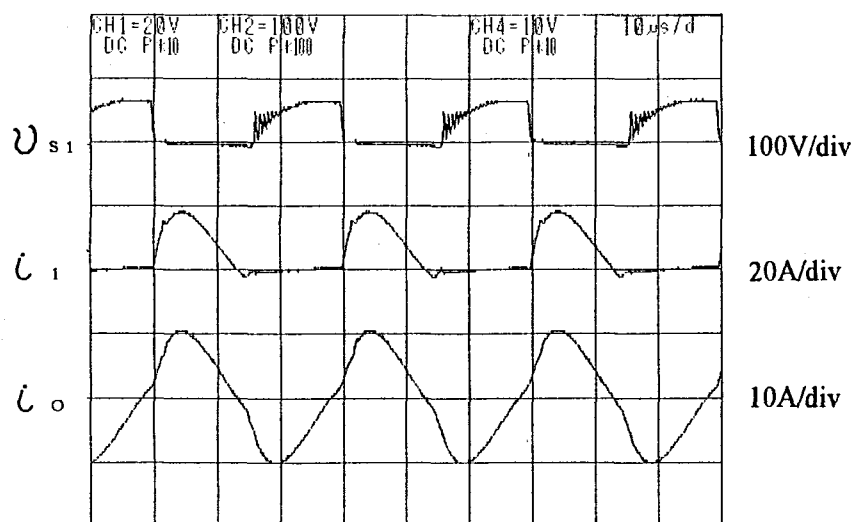


$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.23$
 $\lambda = 0.44$
 $L_o = 200 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 31.0 kHz$
 $t = 700^\circ C$
 $P_{in} = 1238 w$
 $I_d = 9.61 A$
 $E_d = 161.3 V$
 $P_o = 1299 w$
 $I_o = 9.65 A$
 $V_o = 173.6 V$

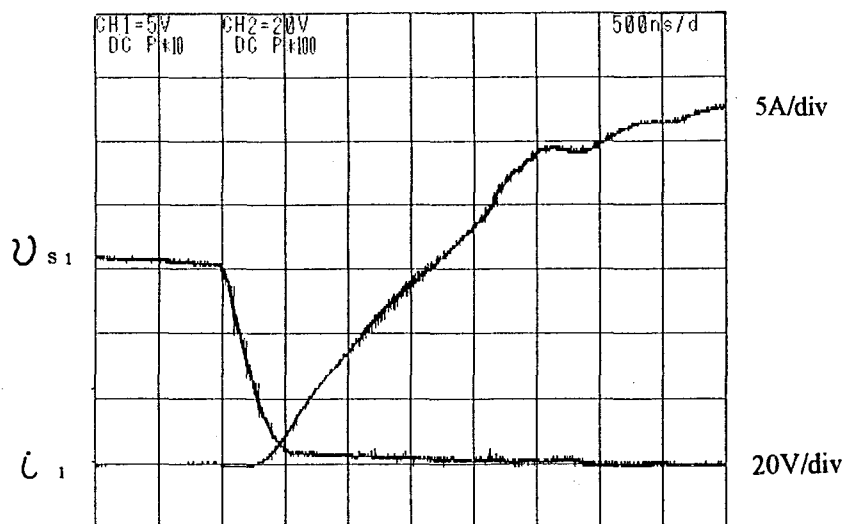


$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.23$
 $\lambda = 0.21$
 $L_o = 200 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 31.0 kHz$
 $t = 746^\circ C$
 $P_{in} = 1276 w$
 $I_d = 13.70 A$
 $E_d = 163.2 V$
 $P_o = 1524 w$
 $I_o = 15.24 A$
 $V_o = 216.0 V$

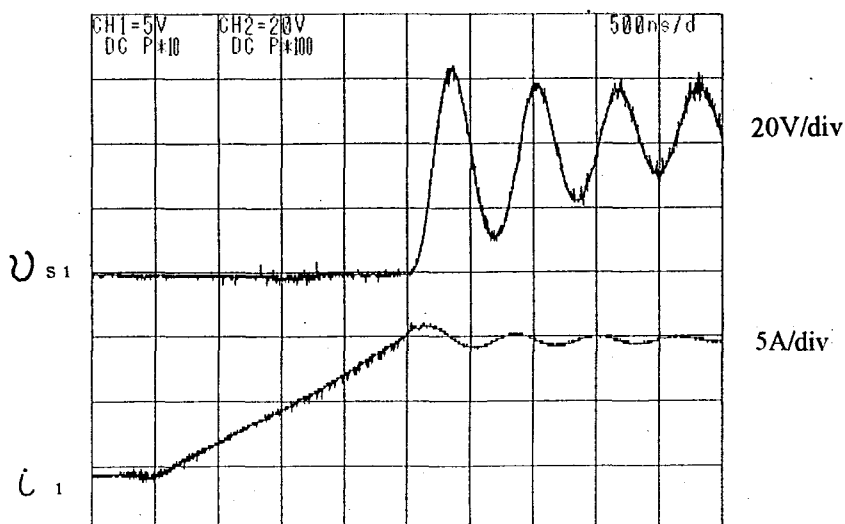
図 4 4 - 3 6 動作波形



$\alpha = 0.09$
 $\mu = 1.31$
 $\lambda = 0.38$
 $L_o = 200 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 33.0 kHz$
 $t = 71.3^\circ C$
 $P_{in} = 877 w$
 $I_d = 8.95 A$
 $E_d = 114.54 V$
 $P_o = 954 w$
 $I_o = 8.95 A$
 $V_o = 156.5 V$

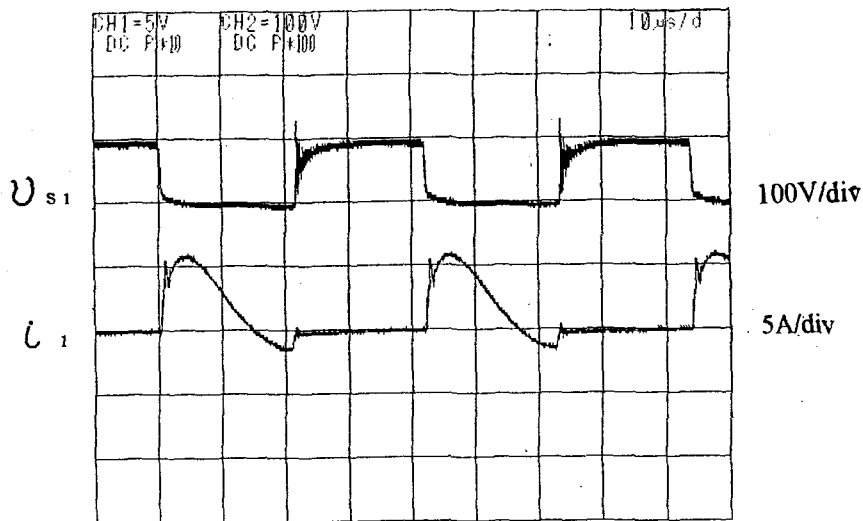


ターンオン波形



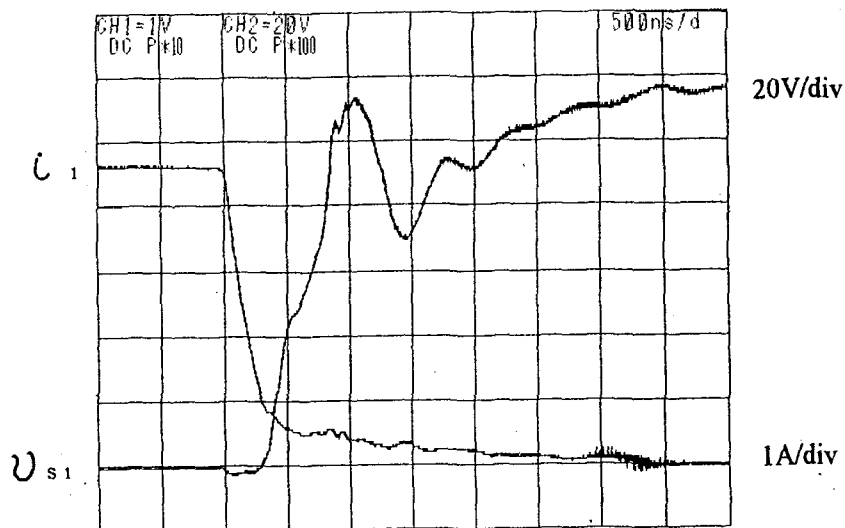
ターンオフ波形

図 4 4 - 3 7 動作波形

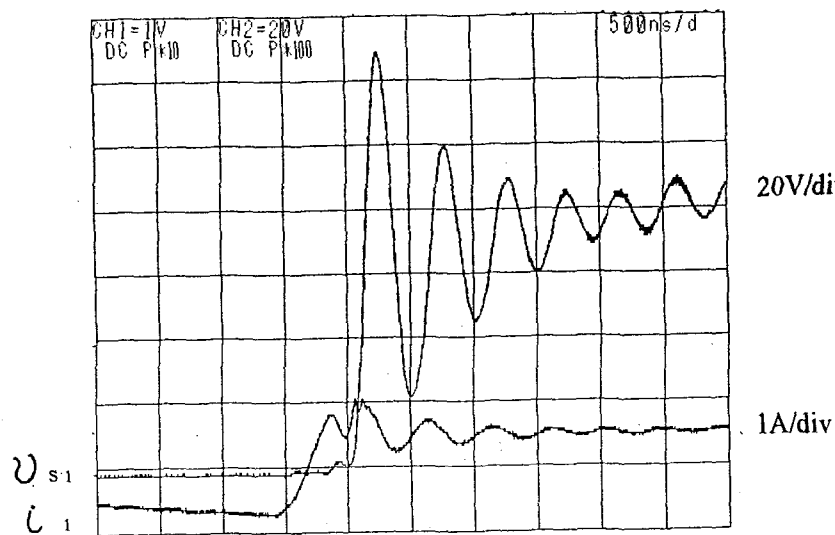


$\alpha = 0$
 $\mu = 0.98$
 $\lambda = 0.46$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.98 kHz$

$P_{in} = 301.0 w$
 $I_a = 4.49 A$
 $E_a = 93.8 V$
 $P_o = 305 w$
 $I_o = 4.5 A$
 $V_o = 99.0 V$

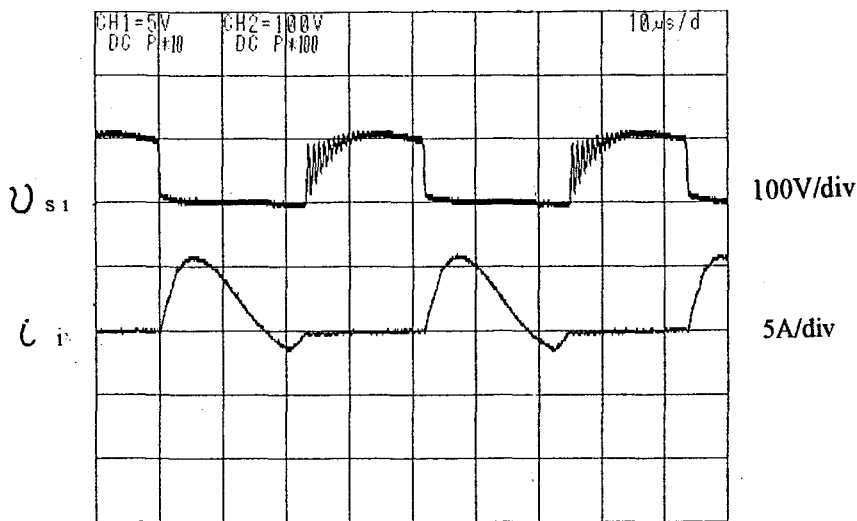


ターンオン波形



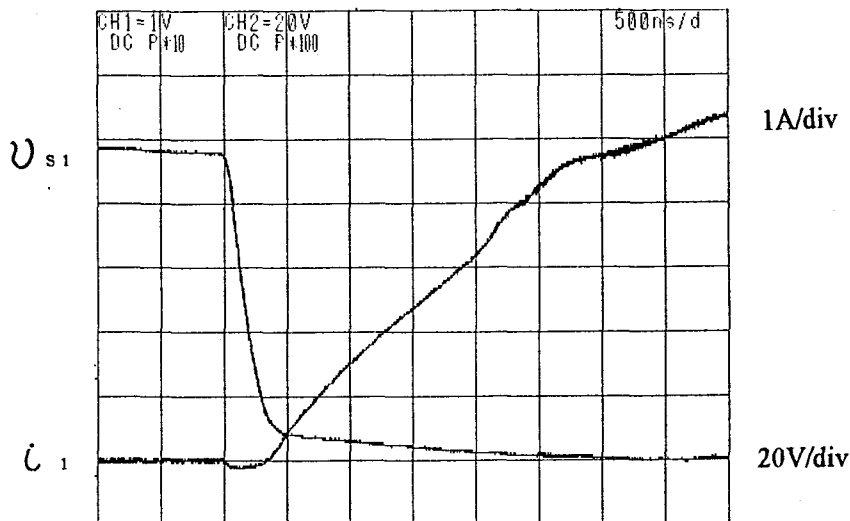
ターンオフ波形

図 4 4 - 3 8 動作波形

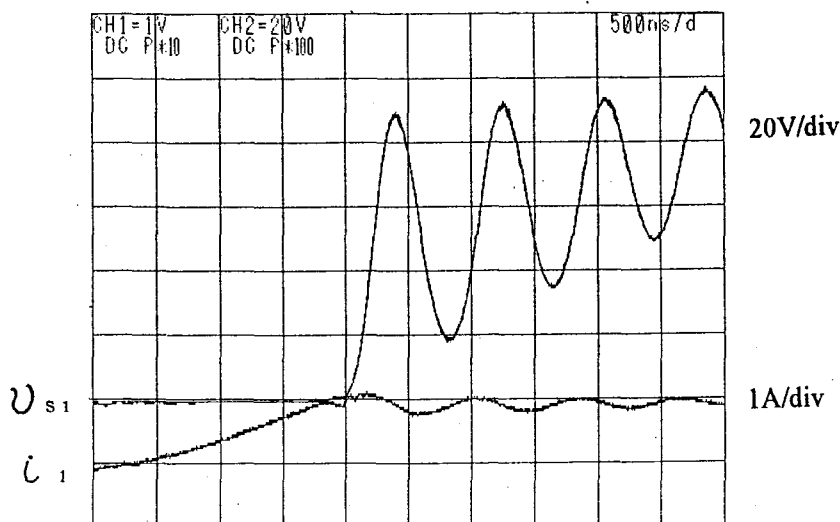


$\alpha = 0.1$
 $\mu = 0.98$
 $\lambda = 0.45$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.98 kHz$

$P_{in} = 308.8 w$
 $I_d = 4.52 A$
 $E_d = 88.7 V$
 $P_o = 310 w$
 $I_o = 4.6 A$
 $V_o = 99.2 V$

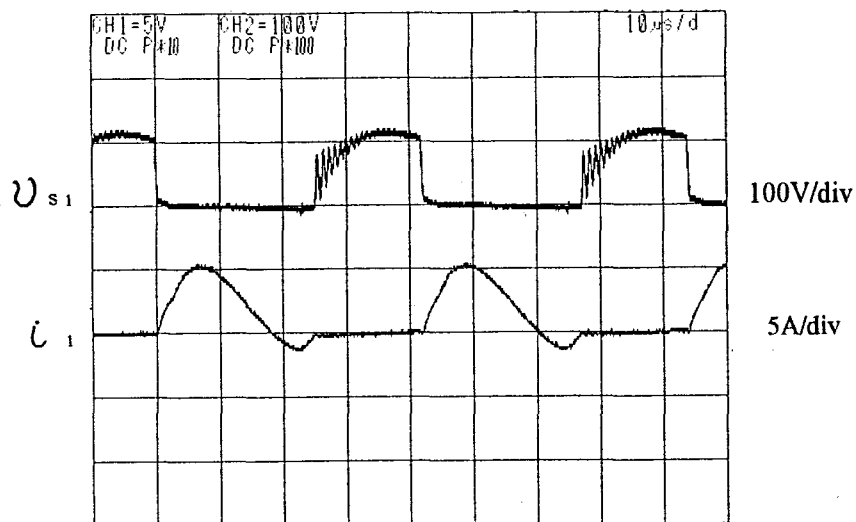


ターンオン波形



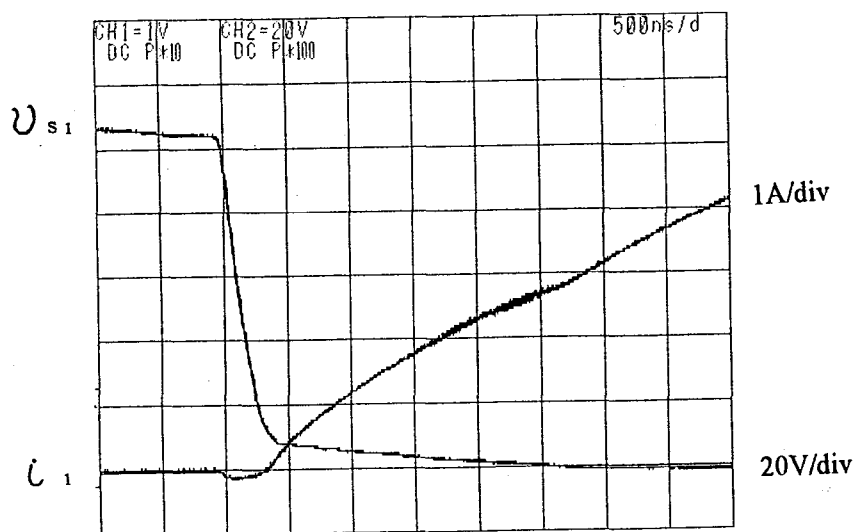
ターンオフ波形

図 4 4 - 3 9 動作波形

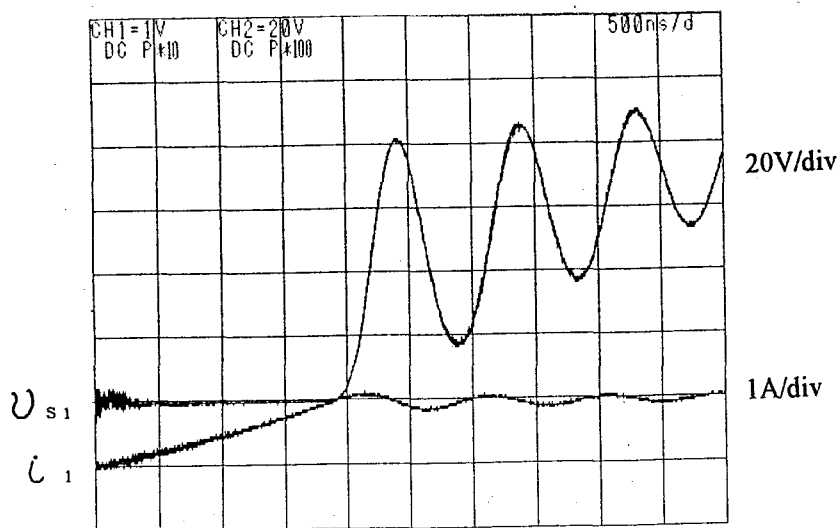


$\alpha = 0.2$
 $\mu = 0.98$
 $\lambda = 0.35$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.98 kHz$

$P_{in} = 302 w$
 $I_d = 4.6 A$
 $E_d = 83.76 V$
 $P_o = 301.6 w$
 $I_o = 4.6 A$
 $V_o = 97.2 V$

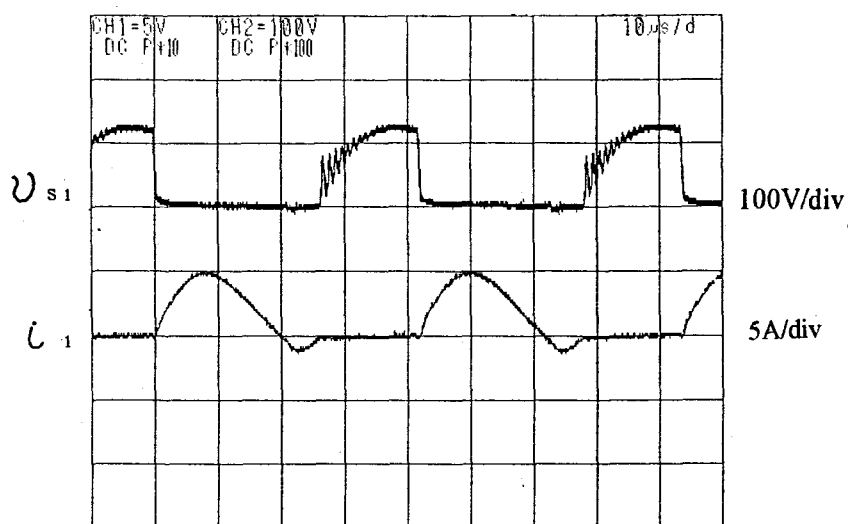


ターンオン波形



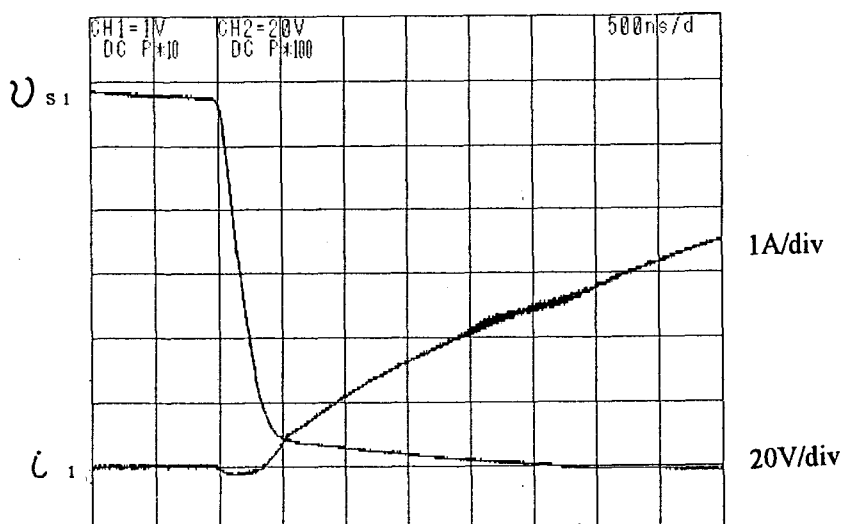
ターンオフ波形

図 4 4 - 4 0 動作波形

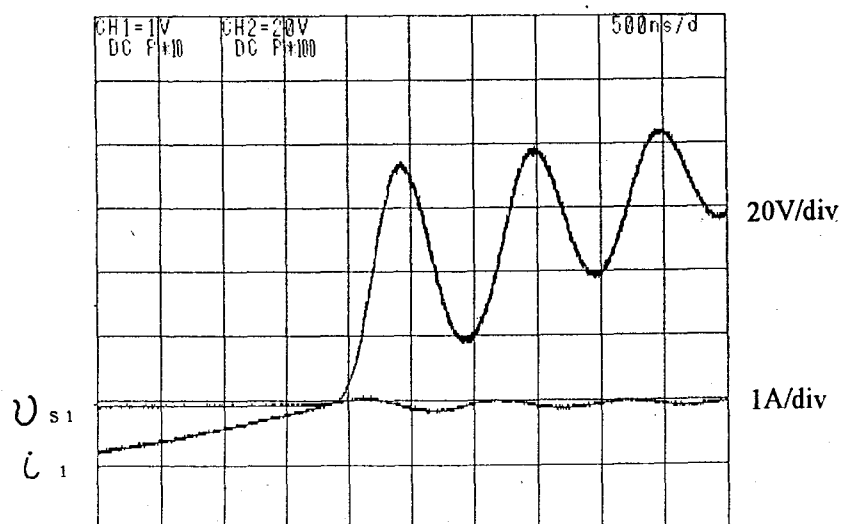


$\alpha = 0.3$
 $\mu = 0.97$
 $\lambda = 0.46$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.98 kHz$

$P_{in} = 302 w$
 $I_d = 4.32 A$
 $E_d = 79.47 V$
 $P_o = 299.1 w$
 $I_o = 4.5 A$
 $V_o = 97.4 V$

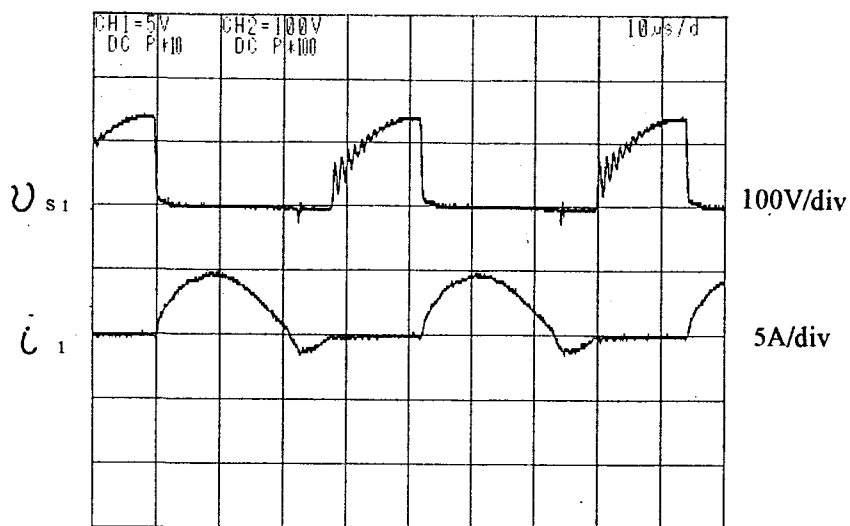


ターンオン波形



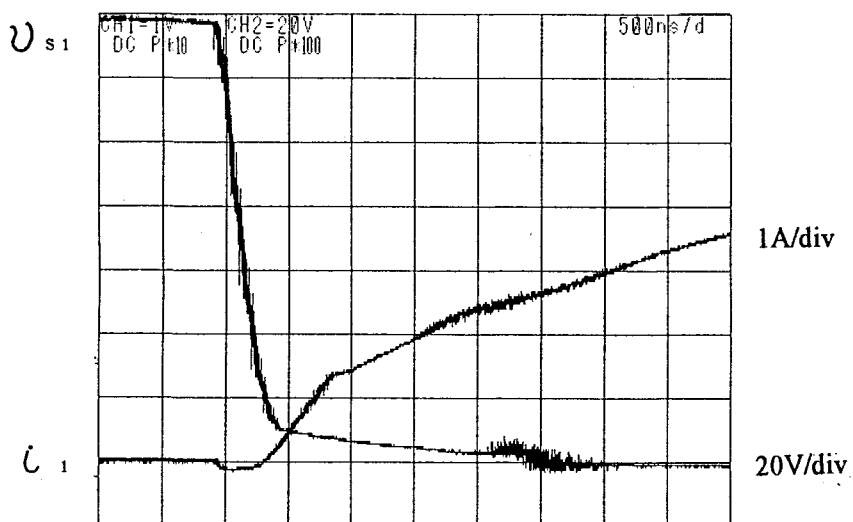
ターンオフ波形

図 4 4 - 4 1 動作波形

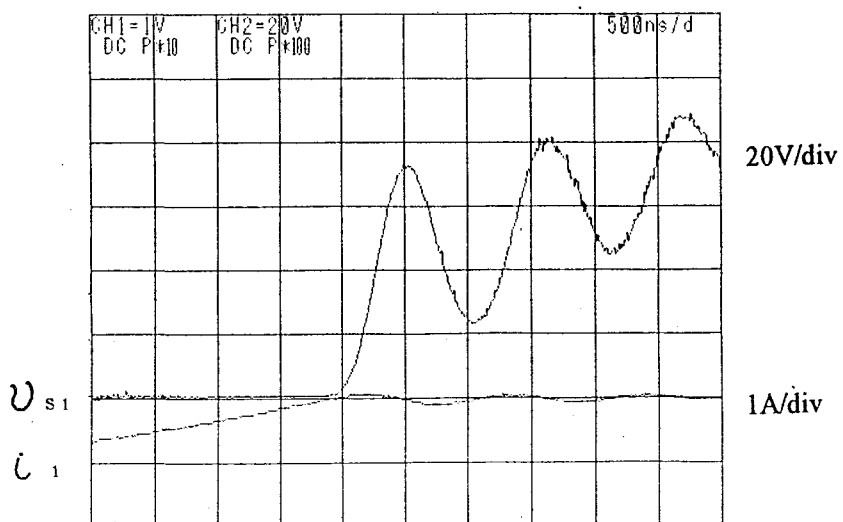


$\alpha = 0.5$
 $\mu = 0.97$
 $\lambda = 0.43$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 23.98 kHz$

$P_{in} = 303.1 w$
 $I_d = 4.24 A$
 $E_d = 77.17 V$
 $P_o = 296 w$
 $I_o = 4.6 A$
 $V_o = 96.0 V$

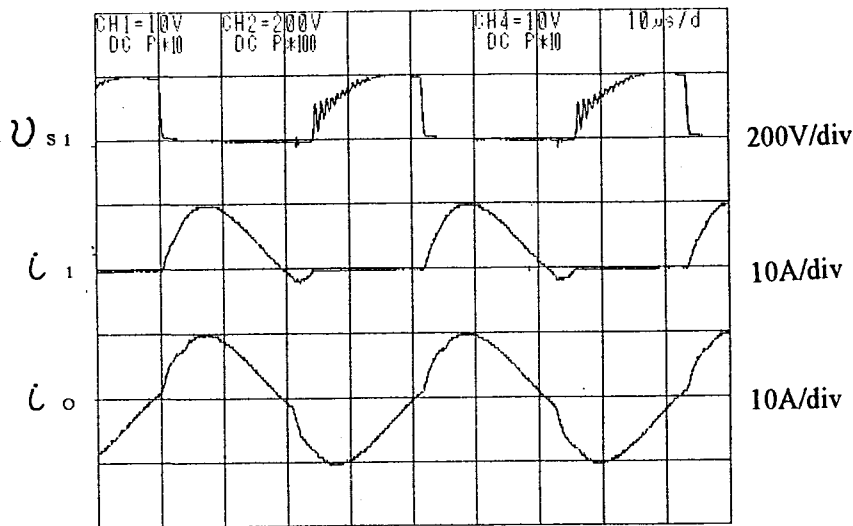


ターンオン波形



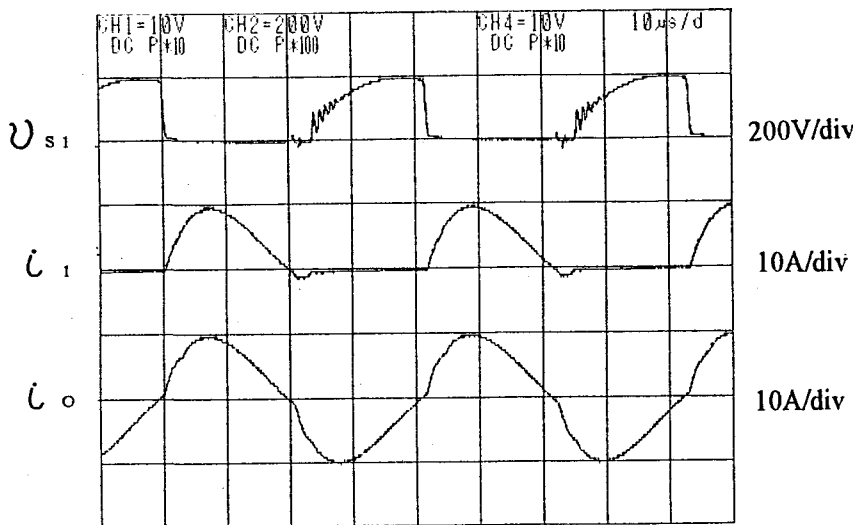
ターンオフ波形

図 4 4 - 4 2 動作波形



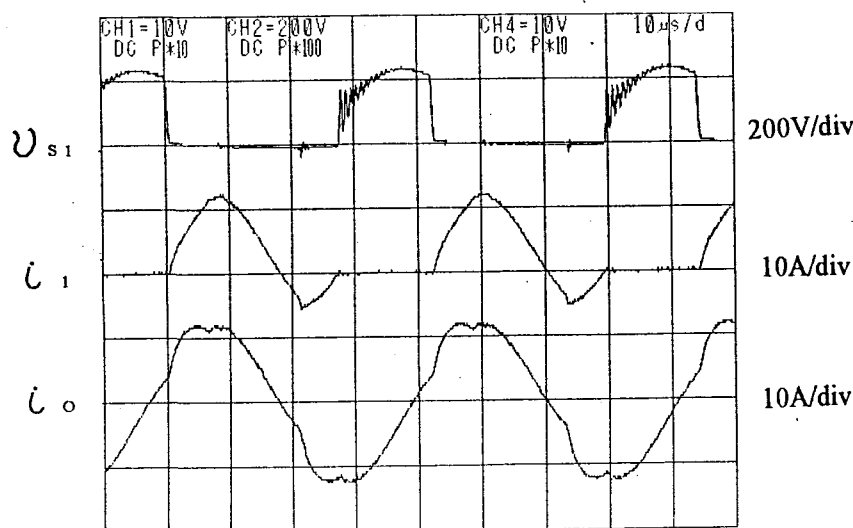
$\alpha = 0.2$
 $\mu = 0.97$
 $\lambda = 0.44$
 $L_o = 211 \mu\text{H}$
 $C_o = 0.2 \mu\text{F}$
 $f_o = 24.0 \text{ kHz}$
 $t = 180^\circ\text{C}$

$E_d = 146.8 \text{ V}$
 $P_o = 1040 \text{ W}$
 $I_o = 8.28 \text{ A}$
 $V_o = 190.8 \text{ V}$



$\alpha = 0.2$
 $\mu = 0.97$
 $\lambda = 0.44$
 $L_o = 211 \mu\text{H}$
 $C_o = 0.2 \mu\text{F}$
 $f_o = 24.0 \text{ kHz}$
 $t = 400^\circ\text{C}$

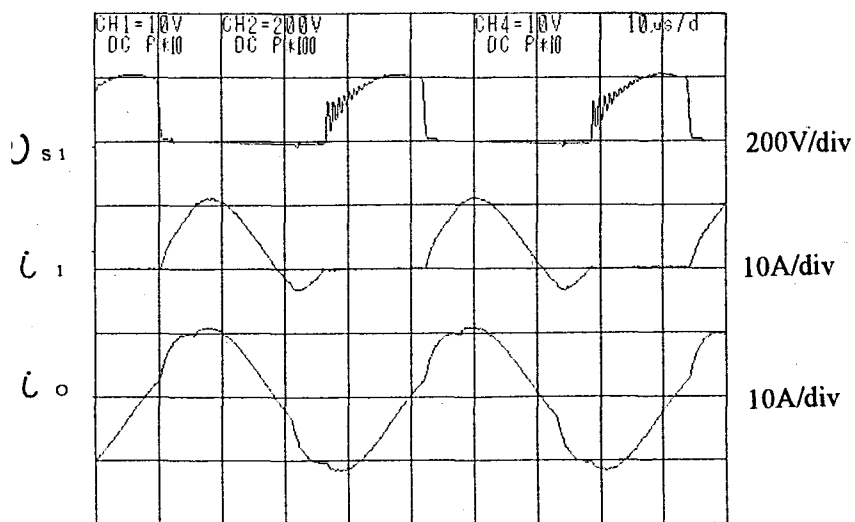
$E_d = 145.5 \text{ V}$
 $P_o = 1060 \text{ W}$
 $I_o = 8.16 \text{ A}$
 $V_o = 198.5 \text{ V}$



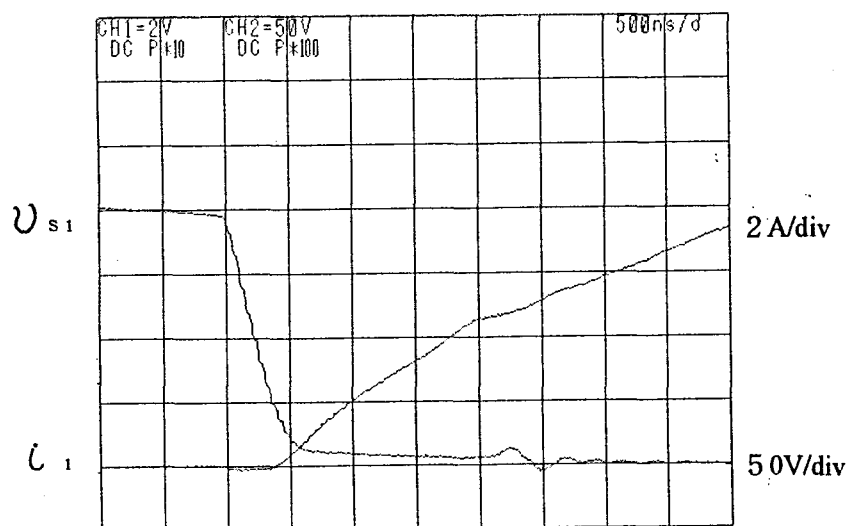
$\alpha = 0.2$
 $\mu = 0.97$
 $\lambda = 0.44$
 $L_o = 211 \mu\text{H}$
 $C_o = 0.2 \mu\text{F}$
 $f_o = 24.0 \text{ kHz}$
 $t = 685^\circ\text{C}$

$E_d = 146.2 \text{ V}$
 $P_o = 1040 \text{ W}$
 $I_o = 10.4 \text{ A}$
 $V_o = 201.8 \text{ V}$

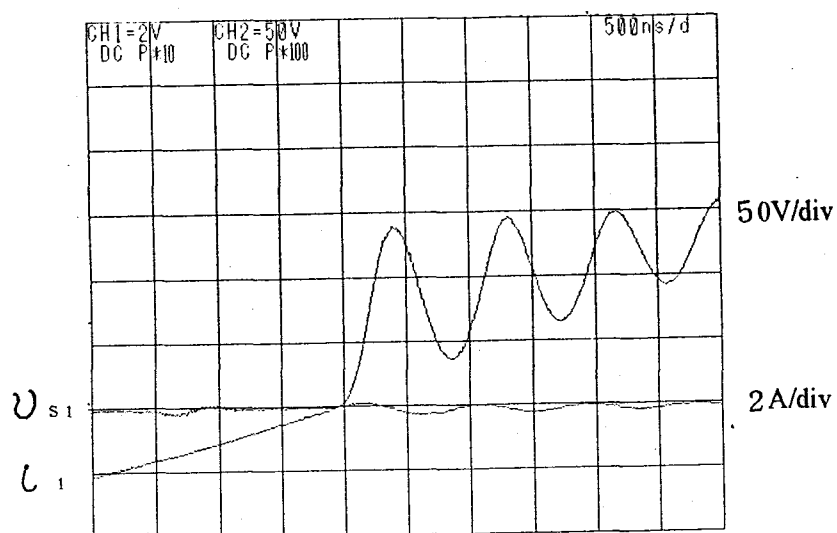
図 4 4 - 4 3 動作波形



$\alpha = 0.2$
 $\mu = 0.97$
 $\lambda = 0.44$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 24.0 kHz$
 $t = 68.2^\circ C$
 $P_{in} = 955.6 w$
 $I_d = 8.66 A$
 $E_d = 136.0 V$
 $P_o = 982 w$
 $I_o = 9.36 A$
 $V_o = 195.1 V$

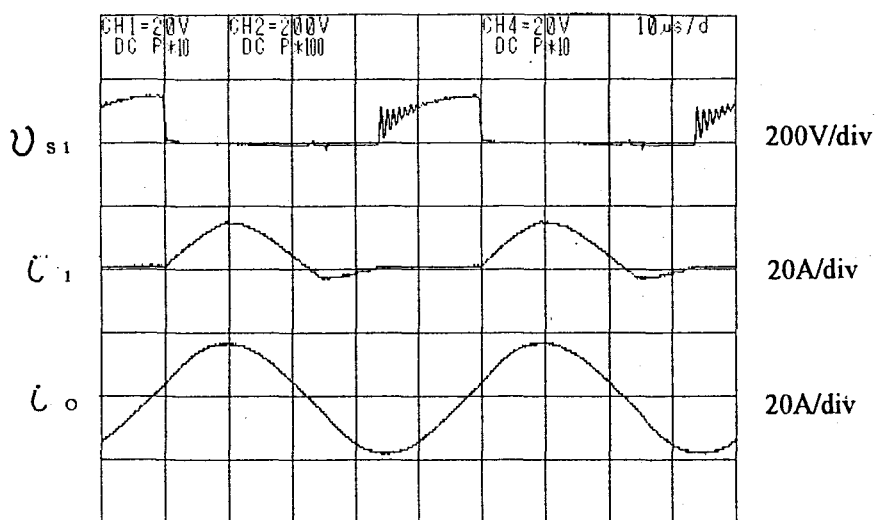


ターンオン波形



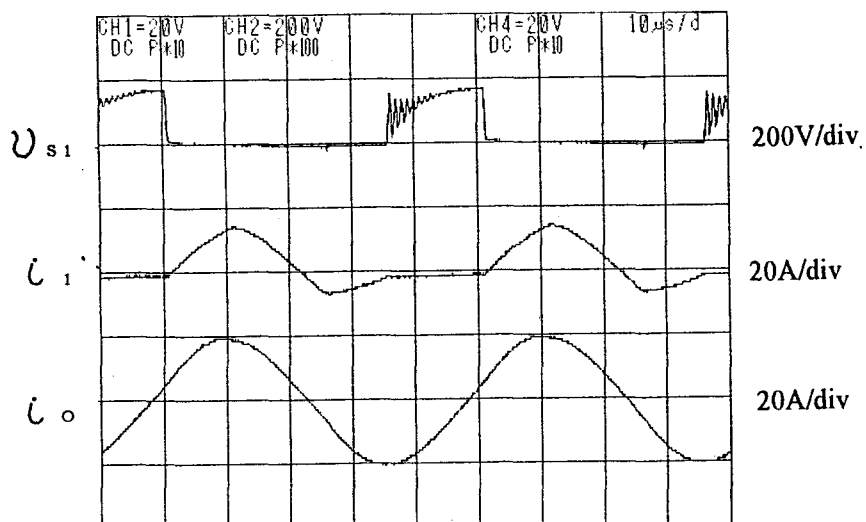
ターンオフ波形

図 4 4 - 4 4 動作波形



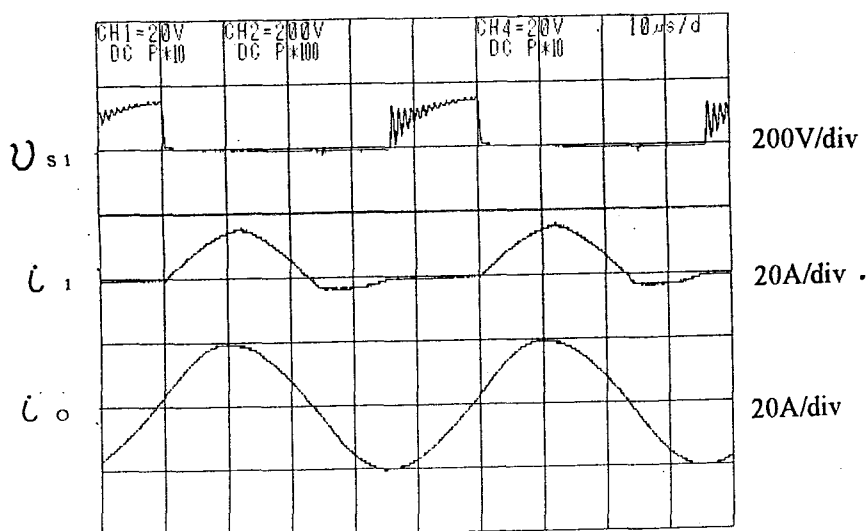
$\alpha = 0.13$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 230 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 19.68 \text{ kHz}$

$P_{in} = 822.9 \text{ W}$
 $I_d = 12.65 \text{ A}$
 $E_d = 82.52 \text{ V}$
 $P_o = 1030 \text{ W}$
 $I_o = 13.72 \text{ A}$
 $V_o = 431.6 \text{ V}$



$\alpha = 0.13$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 230 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 19.84 \text{ kHz}$
 $t = 200^\circ \text{C}$

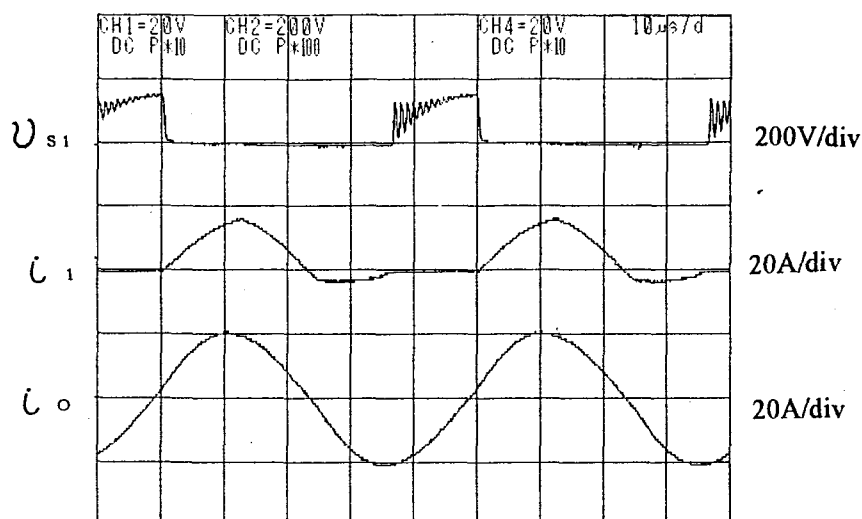
$P_{in} = 967.5 \text{ W}$
 $I_d = 14.09 \text{ A}$
 $E_d = 89.1 \text{ V}$
 $P_o = 1280 \text{ W}$
 $I_o = 16.24 \text{ A}$
 $V_o = 520.3 \text{ V}$



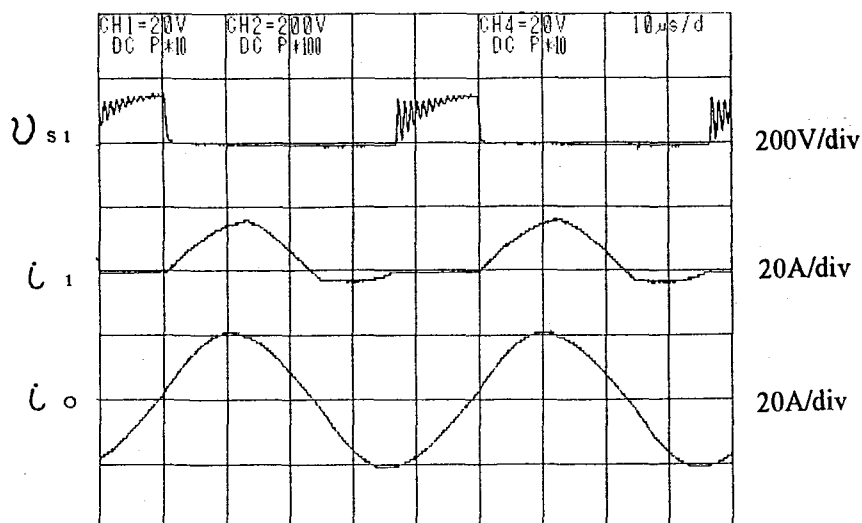
$\alpha = 0.13$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 230 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 20.08 \text{ kHz}$
 $t = 400^\circ \text{C}$

$P_{in} = 859.8 \text{ W}$
 $I_d = 14.45 \text{ A}$
 $E_d = 72.47 \text{ V}$
 $P_o = 1200 \text{ W}$
 $I_o = 16.3 \text{ A}$
 $V_o = 537.7 \text{ V}$

図 4 4-4 5 動作波形

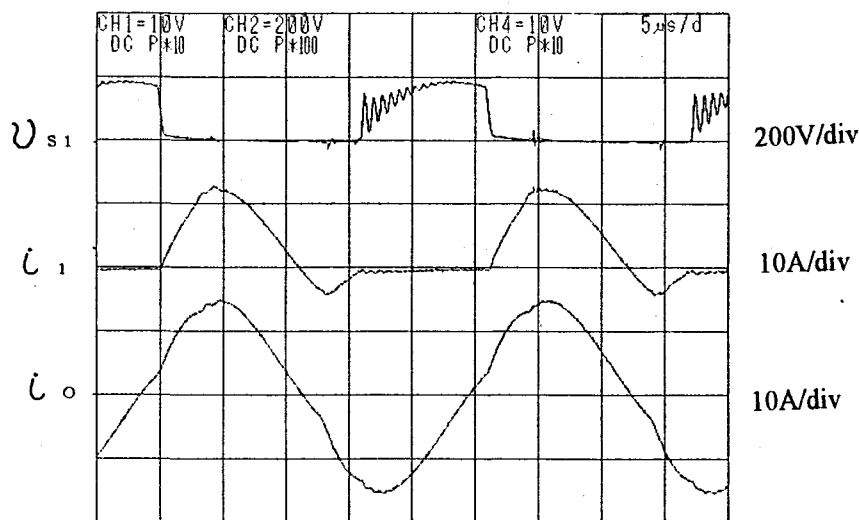


$\alpha = 0.13$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 230 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 20.0 kHz$
 $t = 500^\circ C$
 $P_{in} = 850.4 w$
 $I_d = 14.59 A$
 $E_d = 71.0 V$
 $P_o = 1200 w$
 $I_o = 16.74 A$
 $V_o = 549.4 V$

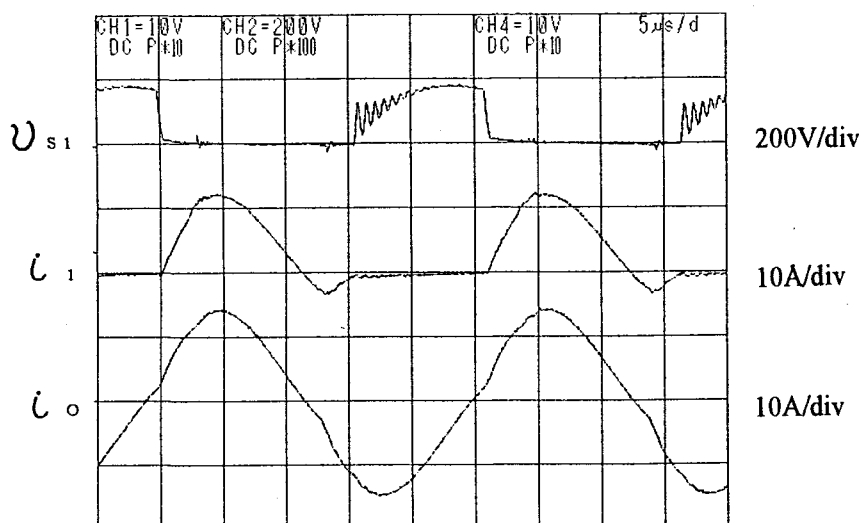


$\alpha = 0.13$
 $\mu = 0.85$
 $\lambda = 0.16$
 $L_o = 230 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 20.0 kHz$
 $t = 555^\circ C$
 $P_{in} = 819.4 w$
 $I_d = 14.06 A$
 $E_d = 68.05 V$
 $P_o = 1200 w$
 $I_o = 16.9 A$
 $V_o = 554.6 V$

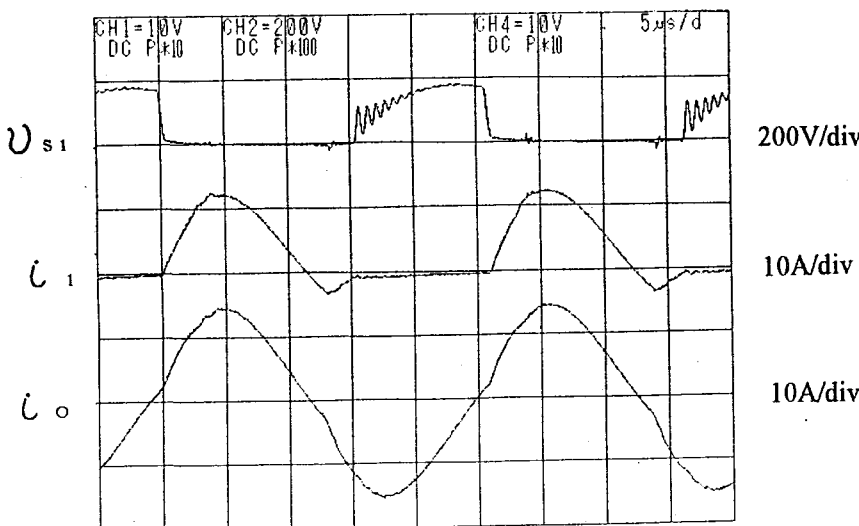
図 4 4 - 4 6 動作波形



$\alpha = 0.11$
 $\mu = 1.57$
 $\lambda = 0.25$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 38.0 kHz$
 $t = 76^\circ C$
 $P_{in} = 1140 w$
 $I_d = 11.7 A$
 $E_d = 128.1 V$
 $P_o = 1200 w$
 $I_o = 12.2 A$
 $V_o = 148.3 V$



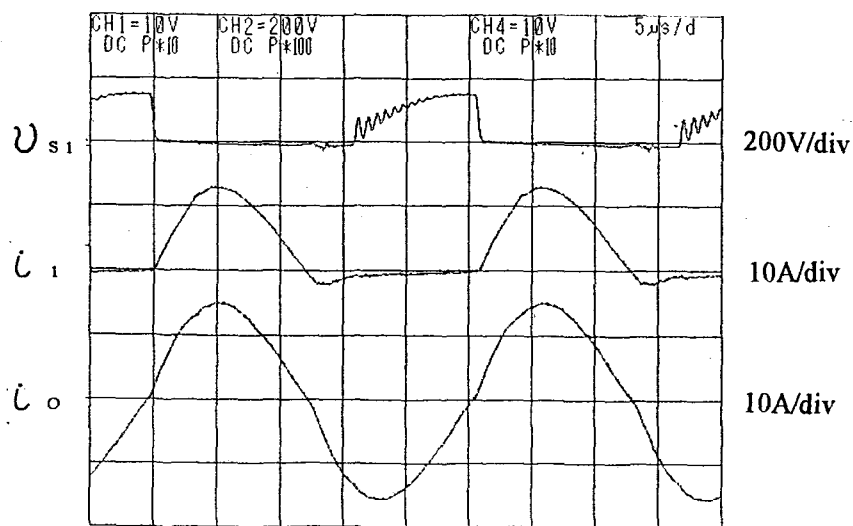
$\alpha = 0.11$
 $\mu = 1.57$
 $\lambda = 0.28$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 38.0 kHz$
 $t = 400^\circ C$
 $P_{in} = 1150 w$
 $I_d = 11.5 A$
 $E_d = 127.1 V$
 $P_o = 1250 w$
 $I_o = 11.8 A$
 $V_o = 151.2 V$



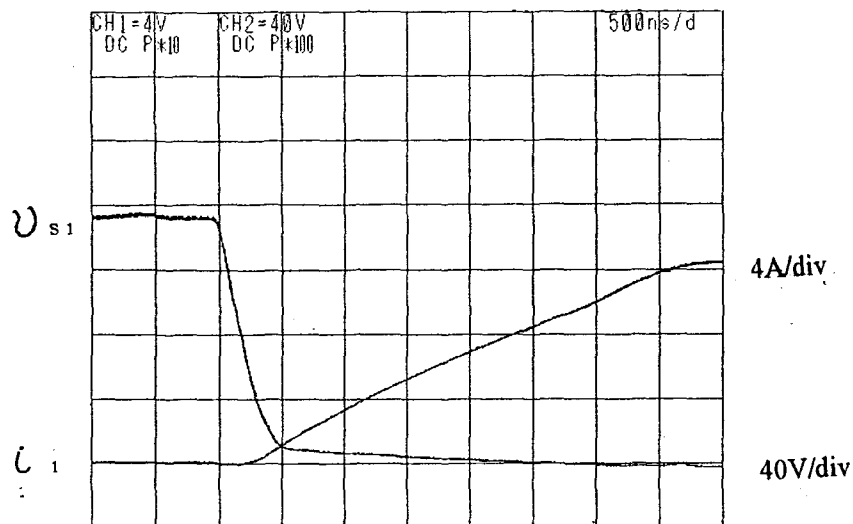
$\alpha = 0.11$
 $\mu = 1.57$
 $\lambda = 0.27$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 38.0 kHz$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 1190 w$
 $I_d = 11.8 A$
 $E_d = 126.6 V$
 $P_o = 1290 w$
 $I_o = 12.06 A$
 $V_o = 156.2 V$

*インピーダンスに変化

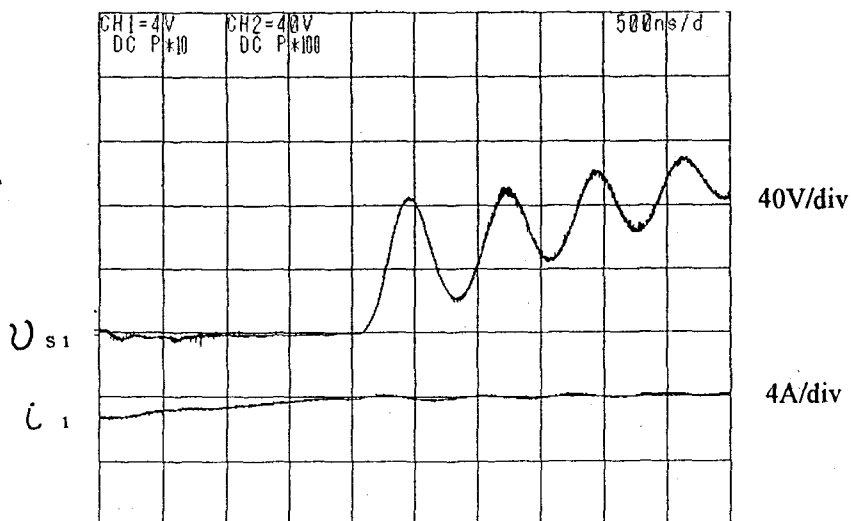
図 4 4 - 4 7 動作波形



$\alpha = 0.11$
 $\mu = 1.57$
 $\lambda = 0.22$
 $L_o = 211 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 38.0 kHz$
 $t = 640^\circ C$
 $P_{in} = 1060 w$
 $I_d = 12.76 A$
 $E_d = 100.0 V$
 $P_o = 1200 w$
 $I_o = 12.93 A$
 $V_o = 176.6 V$

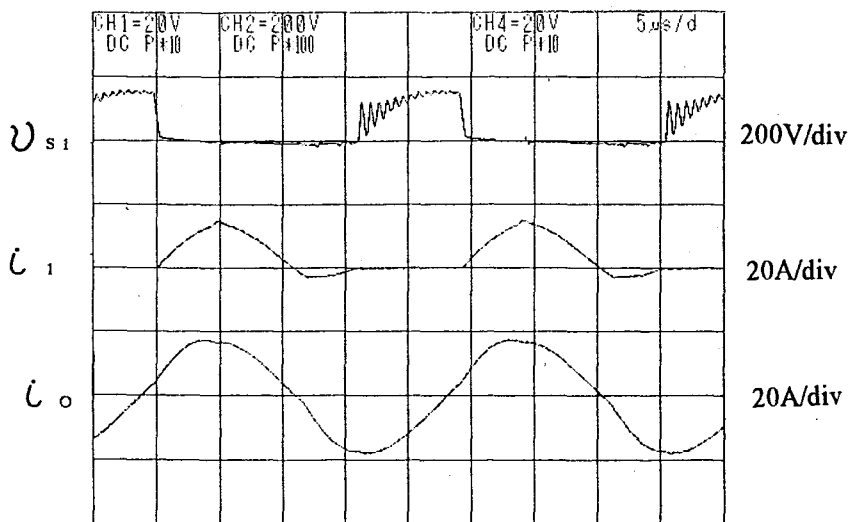


ターンオン波形



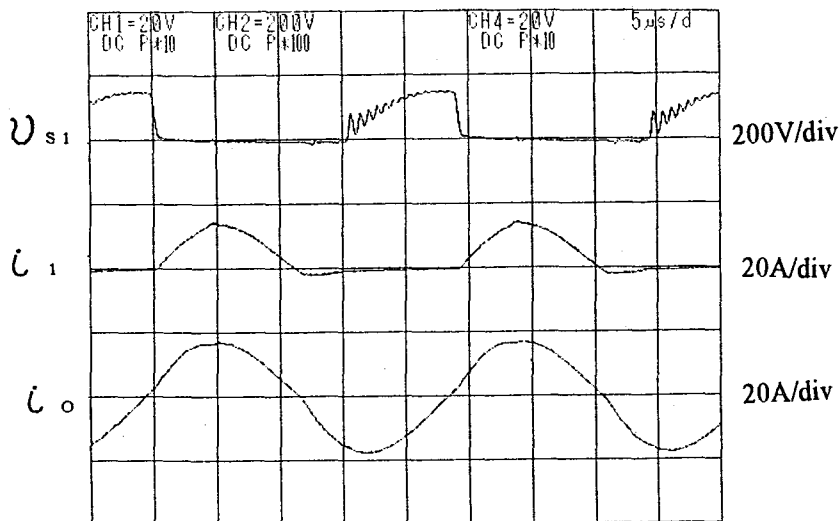
ターンオフ波形

図 4 4 - 4 8 動作波形



$\alpha = 0.14$
 $\mu = 1.24$
 $\lambda = 0.21$
 $L_o = 114.3 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 41.15 kHz$

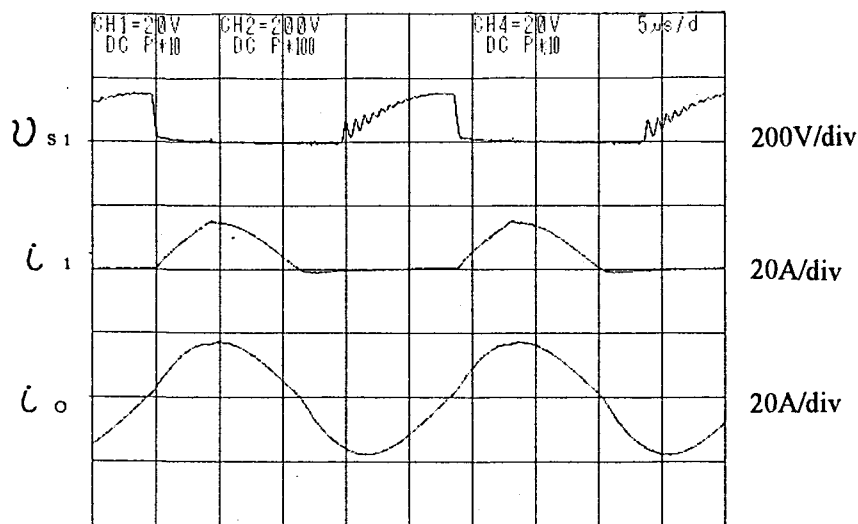
$P_{in} = 875 w$
 $I_d = 13.05 A$
 $E_d = 91.6 V$
 $P_o = 1040 w$
 $I_o = 14.51 A$
 $V_o = 169.1 V$



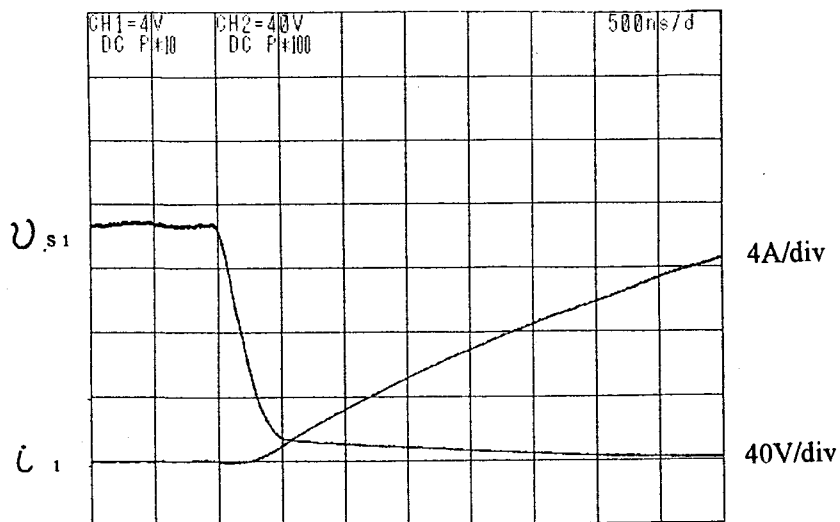
$\alpha = 0.14$
 $\mu = 1.25$
 $\lambda = 0.23$
 $L_o = 114.3 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 41.66 kHz$

$t = 500^\circ C$
 $P_{in} = 900 w$
 $I_d = 13.73 A$
 $E_d = 90.2 V$
 $P_o = 1140 w$
 $I_o = 14.4 A$
 $V_o = 175.0 V$

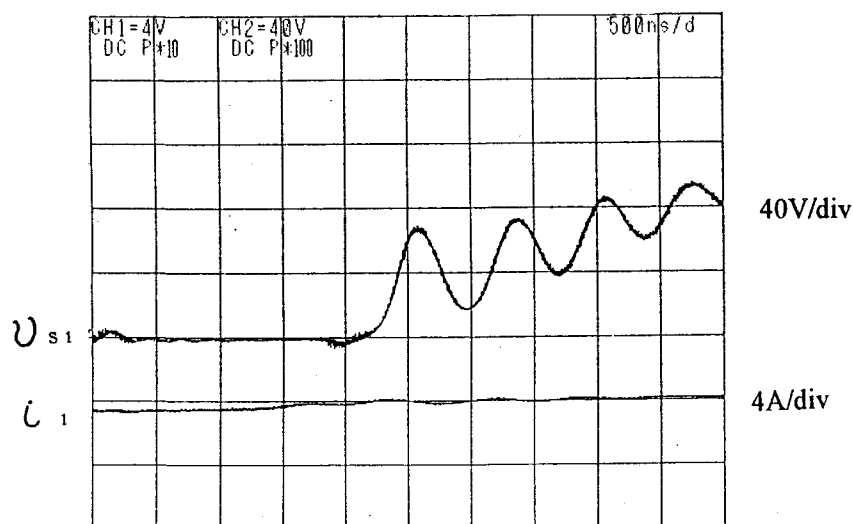
図 4 4 - 4 9 動作波形



$\alpha = 0.14$
 $\mu = 1.25$
 $\lambda = 0.24$
 $L_o = 114.3 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 41.66 kHz$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 1010 w$
 $I_d = 14.08 A$
 $E_d = 89.5 V$
 $P_o = 1190 w$
 $I_o = 14.4 A$
 $V_o = 179.7 V$

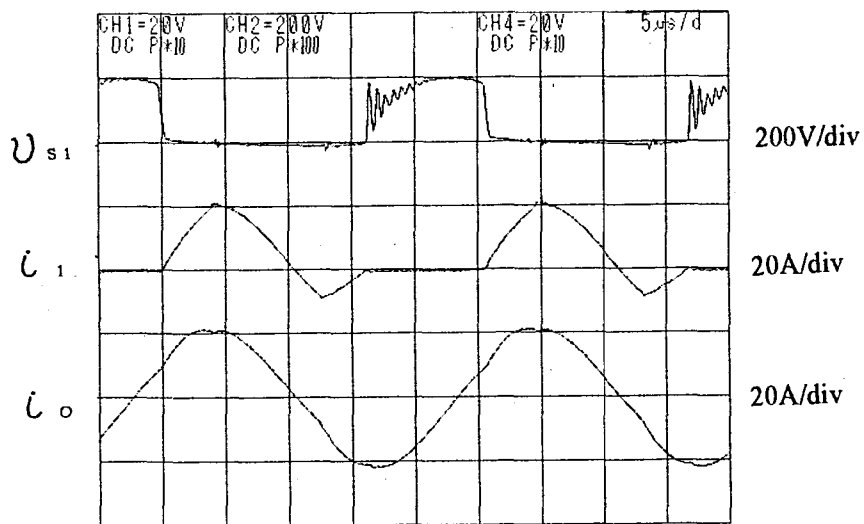


ターンオン波形



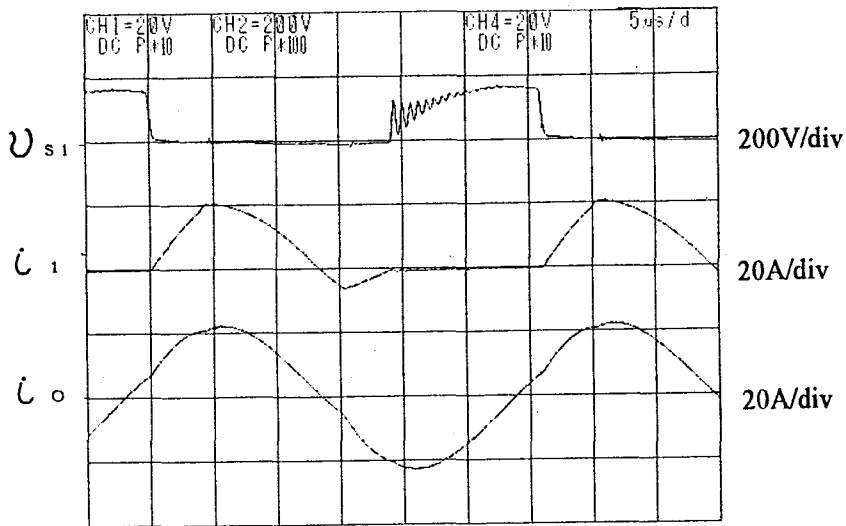
ターンオフ波形

図 4 4 - 5 0 動作波形

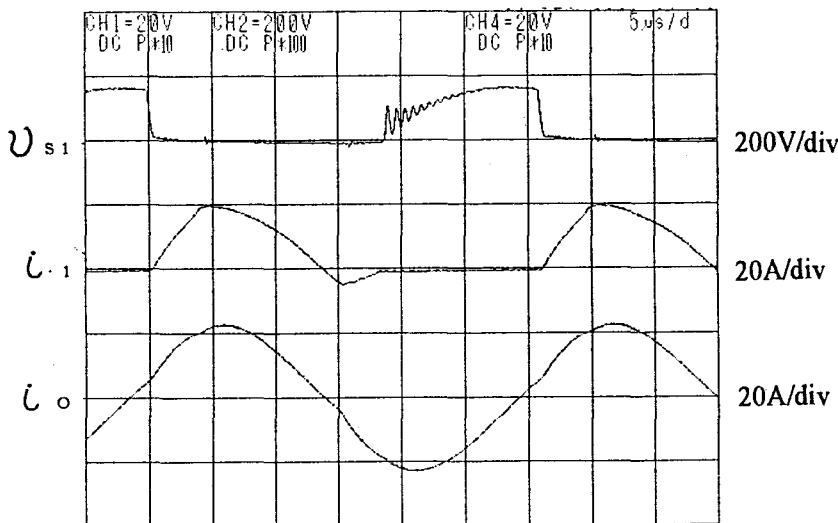


$\alpha = 0.14$
 $\mu = 1.16$
 $\lambda = 0.23$
 $L_o = 112.5 \mu H$
 $C_o = 0.2 \mu F$
 $f_o = 39.06 kHz$
 $P_{in} = 1280 w$
 $I_d = 15.51 A$
 $E_d = 135.0 V$
 $P_o = 1540 w$
 $I_o = 17.63 A$
 $V_o = 199.2 V$

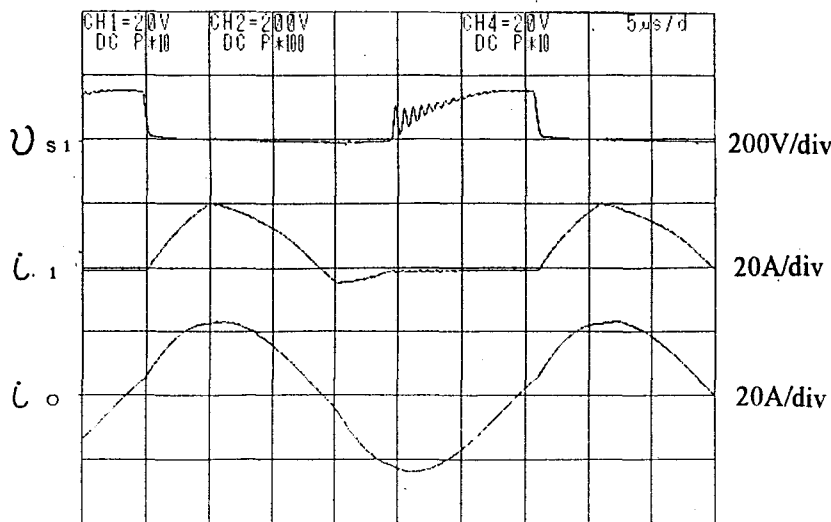
図 4 4 - 5 1 動作波形



$\alpha = 0.14$
 $\mu = 1.17$
 $\lambda = 0.26$
 $L_o = 112.5 \mu H$
 $C_o = 0.3 \mu F$
 $f_o = 32.25 kHz$
 $t = 196^\circ C$
 $P_{in} = 1360 w$
 $I_d = 16.9 A$
 $E_d = 114.7 V$
 $P_o = 1530 w$
 $I_o = 18.2 A$
 $V_o = 179.1 V$



$\alpha = 0.14$
 $\mu = 1.17$
 $\lambda = 0.22$
 $L_o = 112.5 \mu H$
 $C_o = 0.3 \mu F$
 $f_o = 32.25 kHz$
 $t = 600^\circ C$
 $P_{in} = 1400 w$
 $I_d = 17.4 A$
 $E_d = 113.4 V$
 $P_o = 1670 w$
 $I_o = 18.2 A$
 $V_o = 189.0 V$



$\alpha = 0.14$
 $\mu = 1.17$
 $\lambda = 0.22$
 $L_o = 112.5 \mu H$
 $C_o = 0.3 \mu F$
 $f_o = 32.25 kHz$
 $t = 700^\circ C$
 $P_{in} = 1300 w$
 $I_d = 18.0 A$
 $E_d = 98.1 V$
 $P_o = 1500 w$
 $I_o = 19.1 A$
 $V_o = 203.7 V$

図 4 4 - 5 2 動作波形

7. 4 金属フィルタの構造による検討

インバータ回路の動作が安定し、常に1[kw]以上の出力が得られるようになった為、構造の違う金属フィルタを製作した。使用した金属は、誘導起電力を得るために磁性体のものを、そして、腐食が起きにくいものということを考慮して、磁性体のステンレス鋼を選択し、加工する都合上、板厚は0.5ミリを使用した。

図45-(a)は、平成7年度製作したもので、板と板の隙間を3ミリ、長さを180ミリとし、板どうしはスリットを入れた直行する板で止めてある。

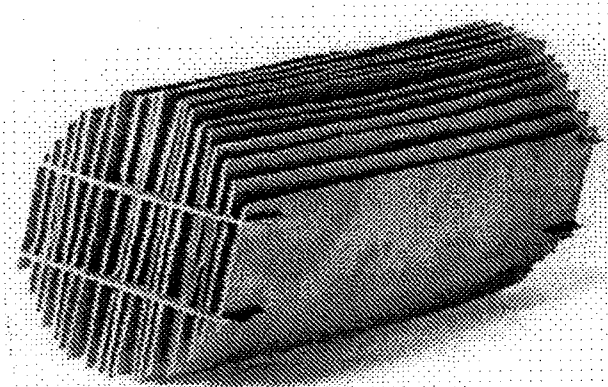
図45-(b)は、(a)の板の隙間を狭め1.5ミリとし、長さも190ミリと大きくして、すすの接触面積を増やした。板どうしは、間にステンレスワッシャーを挟んで止めてある。

図45-(c)は、ワーキングコイルである高周波リッツ線に近いところが一番磁力が強いので、その磁力を使えるように、(b)の構造のフィルタの周りに、0.5ミリのステンレスワイヤを巻いた。

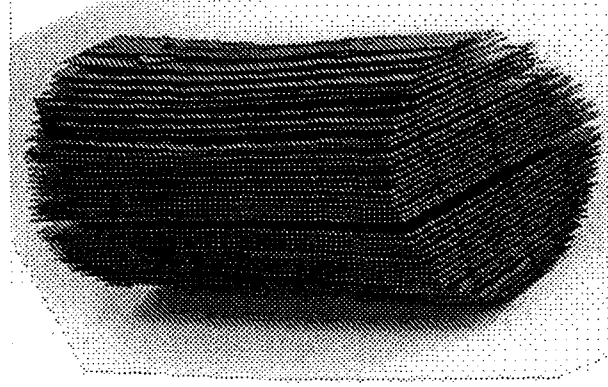
図45-(d)は、誘導起電力に対し、直行する向きに電流が流れるということを考え、(b)の構造の両端にスリットを入れて、直行する板を3枚ずつ、計6枚さしてある。

図45-(e)は、(c)と(d)の構造を合わせたもので、(b)の構造の両端にスリットを入れ、計6枚の板を刺し、その周りに0.5ミリのステンレスワイヤを巻いた。

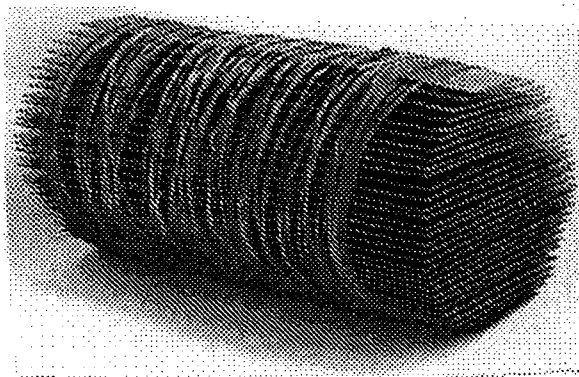
この5つのフィルタを水平に吊した状態で、出力一定で加熱し比べた結果、ワイヤを巻いたものの方が抵抗 R_o の値が大きく、初期の温度上昇が速く、加熱しやすかった。しかし、最終的な温度と、それに要した時間は、あまり変わらなかった。これは、次に示すが、温度変化により、フィルタの金属組成が変化するとと思われる辺りで、温度上昇が停滞してしまうためと思われる。



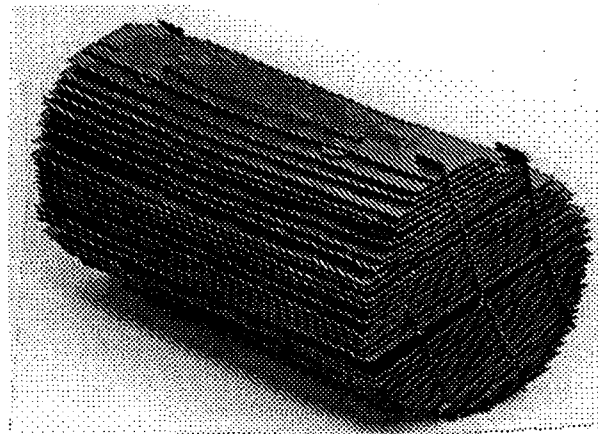
(a)



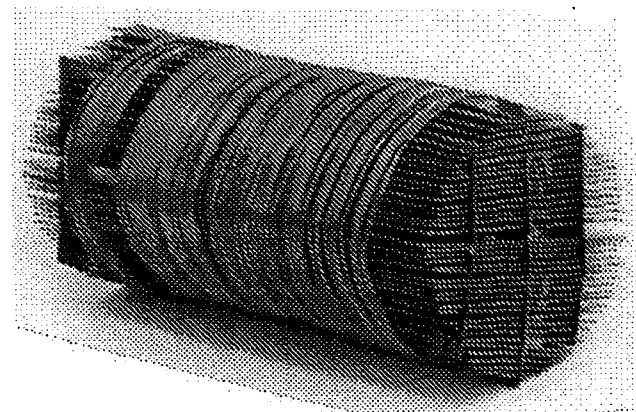
(b)



(c)



(d)



(e)

図 4 5 金属フィルタの構造

7. 5 温度変化による金属フィルタの変化

今回の実験中に、550℃を過ぎて600℃近くになると、たいてい急激な波形や入出力値の変化が起きた。そこで、温度変化におけるインダクタンス： L_o の値と抵抗値： R_o を計測した。グラフを図46に示す。

図46からわかるように、600℃までは緩やかに L_o の値が大きくなっているが、600℃を過ぎると急激に、それも常温の値よりも、はるかに小さくなっている。つまり、この辺りの温度に達すると金属組成が変わってしまうものと思われる。また、抵抗値： R_o の方は、温度上昇に伴い、やや増大の傾向が見られるものの、その変化も小さいことがわかる。従って、この辺りに達したとき、 L_o の急激な変化によって、ZCS動作領域を外れてしまったときに、スパイクやサージにより、スイッチング素子を破壊してしまう危険性がある。

今回は基礎実験という事で、常温における値で回路設計を行い、温度上昇に伴うリアクタンス変化に対し、手動によるコントロールを行った。今後、実システム駆動においては、共振点追尾等の制御が必要となってくるとと思われる。

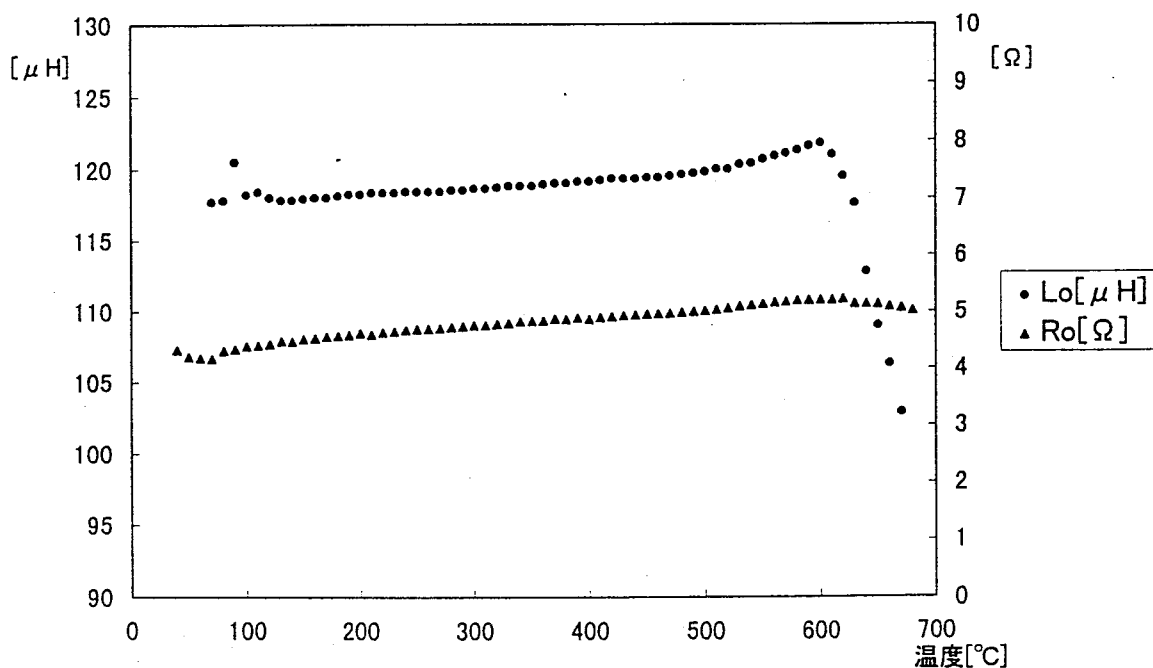


図 4 6 温度変化によるインダクタンス及び抵抗値の変化

第 8 章 結 言

本論文では、高周波誘導加熱用電源として、DCL型フルブリッジZCS高周波インバータを提案し、その定常諸特性を数値解析と実験結果の比較、対照より検討した。また、その応用としての、排出微粒子低減システムと、その負荷としての金属フィルターの構造を提案し実設計に基づき製作、実験を行った。

下記に本研究で得られた内容を要約する。

- (1) 新しい回路トポロジーの改良形高周波インバータを提案し、その特徴である、アノードリアクトル ($L_1 \sim L_4$) から、入力直流リアクトル L_d への変更、さらに L_o に対する比率 (リアクトル比 α) を検討することにより、ソフトスイッチングとしてのゼロ電流スイッチング (ZCS) 特性を改善するとともにその動作原理を明らかにし、回路の小型・簡素化を実現した。
- (2) 無次元化パラメータ (μ 、 λ) を導入した数値解析より、ZCS動作領域を無次元化 $\mu - \lambda$ 平面に明らかにすると共に、ZCS動作を数値解析と実験の両面から検討した。その結果、理論値の傾向は実験値と非常によく一致しており、理論の正当性を裏付けた。
- (3) 共振を利用する高周波インバータで問題となっている、スイッチング素子の動作責務を、 $\mu - \lambda$ 無次元化平面上のZCS動作領域における各特性値の分布を明らかにすることにより、回路設計で必要とされるデータを詳述した。
- (4) ZCS動作諸特性に基づき、排出微粒子低減システム用高周波誘導加熱電源を設計し、実システム駆動によりその効果を評価、検討した。その結果、負荷駆動時の各部動作波形において、サージ電流やスパイク電圧の発生は認められず、ZCSの効果を実証した。
- (5) 形状の違う数種類の金属フィルターを製作し、すす (排出微粒子) の燃焼実験を実施。実際に燃焼温度まで加熱し、燃焼することを確認した。また、温度上昇に伴うリアクタンス変化も検証した。

以上により、本研究において今回提案したDCL型フルブリッジZCS高周波インバータが、高周波誘導加熱用電源として有効であることを実証すると共に、排出微粒子低減システムの有用性も確認できた。

また、今後の検討課題として以下の事が挙げられる。

- ① 負荷電流を、よりハイパワー化するためのマッチング・トランスの検討。
- ② 加熱装置部の巻き線（ワーキングコイル）の巻き数、巻き方の検討。
- ③ フィルタの形状、及び材質の検討。
- ④ 巻き線（ワーキングコイル）の耐火、断熱化の検討。
- ⑤ 実システム駆動による実負荷条件下における燃焼実験。

以上の点を考慮し、今後は実際のディーゼルエンジン排ガスの排出微粒子の、効率化とシステムの実用性、信頼性の検討をさらに展開していく必要があると考える。

謝 辞

最後になりましたが、本論文を作成するにあたり、御指導、御鞭撻を賜った、東京商船大学、推進システム講座の畑中義博教授、及び同講座の国武千歳助手、大学院生の鈴木昌樹さん、関谷佳明さんに深く感謝と御礼を申し上げます。

参考文献

【参考文献】

- (1) 横尾敏浩 : 「トランジスタを使用した高周波誘導加熱電源」
電興技報 No. 25 (1991)
- (2) 高橋勘次郎 : 「高周波の基礎と応用」
東京電機大学出版局
- (3) 電気学会技術報告(Ⅱ部), 第443号 (平成4年4月)
- (4) 畑中義博、山神正文 : 「電磁推進用ハイパワー高周波電源について」
日本船用機関学会 第52回(平成5年秋季)講演前刷88-92
- (5) 畑中義博、孫建 : 「改良形ZCS高周波インバータ」
平成6年電気学会全国大会講演論文集(平成6年3月)6-257
- (6) 畑中義博 : 「電圧形フルブリッジZCS高周波インバータ」
平成6年電気学会産業応用部門論文集(平成6年6月)114, p. 616-622
- (7) 畑中義博、塚本次郎 : 「排出微粒子低減用高周波誘導加熱電源の基礎研究」
日本船用機関学会 第53回(平成6年春季)講演予稿集124-127
- (8) Y. Hatanaka C. Kunitake J. Tsukamoto Y. Uchihori Y. Kawamura
"Applications of Soft Switching High Frequency inverter
for Reduction of NOx and Particulates",
M. E. S. J., Proceedings of ISME Yokohama'95 Vol. 1 (1995-7)
- (9) 熊谷政輝、竹村秋宏 : 「高周波誘導加熱電源の研究」
卒業論文(平成5年)
- (10) 塚本次郎、村関賢一 : 「高周波電磁推進システムの研究」
卒業論文(平成5年)

- (11) 信田剛秀 : 「高周波電磁推進の研究」
卒業論文 (平成6年度)
 - (12) 佐野一成、瀬尾誠、富永真 : 「高周波誘導加熱の最適設計に関する研究」
卒業論文 (平成6年度)
 - (13) 窪田祥朗 : 「高周波電磁推進システムの研究」
修士論文 (平成7年度)
 - (14) 塚本次郎 : 「誘導加熱電源用高周波インバータの研究」
修士論文 (平成7年度)
 - (15) 畑中義博、国武千歳、信田剛秀 : 「DCL利用転流重複ZCS高周波インバータ」平成8年電気学会全国大会講演予稿集 (平成8年3月) 4-192
 - (16) 畑中義博、国武千歳、関谷佳明 : 「排出微粒子低減用誘導加熱ZCS高周波インバータ」平成8年電気学会全国大会講演予稿集 (平成8年3月)
 - (17) 畑中義博 : 「排出微粒子低減誘導加熱ZCS高周波インバータ」
平成8年電気学会産業応用部門全国大会 (平成8年)
-